

高炉スラグ細骨材を混和し低度処理再生粗骨材を
全量使用したフレッシュコンクリートの施工性能と
凍結融解抵抗性に関する研究

2019 年 3 月

辻本 和敬

目 次

第1章 序 論

1	研究の背景	1
1.1	はじめに	1
1.2	コンクリートの骨材について	2
1.3	再生骨材について	3
1.3.1	再生骨材を使用したコンクリートの品質について	4
1.4	高炉スラグ骨材について	5
1.5	研究の目的	6
1.6	本論文の構成	6
	参考文献	7

第2章 既往の研究

2.1	はじめに	8
2.2	再生骨材を用いたコンクリートの耐久性における既往の研究	8
2.3	再生骨材を用いたコンクリートの施工性能における既往の研究	9
2.4	再生骨材と混和材を混合した再生骨材コンクリートの 耐久性における既往の研究	10
2.5	再生骨材コンクリートの課題について	10
	参考文献	10

第3章 高炉スラグ細骨材を混和し低度処理再生粗骨材を全量使用した再生骨材コン クリートの施工性能に関する一考察

3.1	概説	12
3.1.1	はじめに	12
3.1.2	高炉スラグ細骨材について	13
3.1.3	低度処理再生粗骨材について	14
3.2	実験概要	15
3.2.1	使用材料	15
3.2.2	フレッシュコンクリートのスランプと単位セメント量について	16
3.2.3	コンクリートの配合条件	16
3.2.4	試験方法	17
3.3	実験結果および考察	19
3.3.1	ブリーディング性状	19
3.3.2	間隙通過性状	19
3.4	第3章のまとめ	21
	参考文献	22

第4章 普通コンクリートの普通強度域配合条件における高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性に関する一考察

4.1 概 説	23
4.1.1 はじめに	23
4.2 実験概要	23
4.2.1 使用材料	23
4.2.2 コンクリートの配合条件	24
4.2.3 試験方法	25
4.3 実験結果および考察	26
4.3.1 圧縮強度試験結果	26
4.3.2 凍結融解抵抗性の試験結果	28
4.3.3 凍結融解抵抗性と間隙通過試験の検討	29
4.4 第4章のまとめ	30
参考文献	31

第5章 高炉セメントを使用し高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの施工性能と凍結融解抵抗性の検討

5.1 概 説	32
5.1.1 はじめに	32
5.2 実験概要	33
5.2.1 使用材料	33
5.2.2 コンクリートの配合条件	34
5.2.3 試験方法	34
5.3 実験結果および考察	36
5.3.1 フレッシュコンクリートの性状	36
5.3.2 硬化後のコンクリートの性状と施工性能	41
5.4 第5章のまとめ	46
参考文献	46

第6章 結論

6.1 結論	48
6.2 今後の展望	51

謝辞	53
----	----

第1章 序 論

1 研究の背景

1.1 はじめに

近代におけるコンクリートは、社会資本を建設する為の材料として欠かせないものとなった。またコンクリートは、土木構造物（橋梁、トンネル、ダム、基礎躯体など）、建築構造物（ビル、一般住宅など）における主要部材として利用されている。さらには、工業製品（外装、擁壁、防音壁等）にも利用される幅広い用途を持つ材料である。その起源は紀元前までさかのぼることになる。

紀元前のコンクリートは、古代コンクリート¹⁾としてBC7000年頃に石灰石をベースとしたセメントとして用いられ、BC2700年頃のエジプトピラミッドに石材間充填材に用いられていた記録がある。コンクリートが構造物の製造に本格的に用いられるようになるのはローマ帝国時代であり、ローマン・コンクリートとして構造物や建築の主要材料として利用され、石灰石、火山性堆積物（ボツォラーナ）、骨材（軽石）から作られていた。

ローマン・コンクリートは、写真1.1に示した様なパルテオンドーム、カラカラ浴場などに利用された記録が残っている。ローマン・コンクリートは、古代コンクリートと違い火山性堆積物（ボツォラーナ）を使用することにより水硬化性（現代コンクリートと同じ水和反応で硬化する）を持っており、型枠として石やレンガを積み、その中にモルタルを流し込んだ後に大理石やレンガ破片を敷き詰め、再度モルタルを流し込んで一体化させていた。その後、1300年間は、彫刻など細かな加工が施しやすい石造構造物が主流となりコンクリートの発展は見られなかったが、1800年代にイギリスのジョセフ・アスプディンがポルトランドセメントを発明し、現代コンクリートの先駆となった。我が国においても、明治維新以後、宇都宮三郎が大久保利通らと欧米視察に同行してヨーロッパのセメント生産技術を学び、帰国後、日本国内で産出される石灰岩などの利用した純国産のセメント製造技術を確立し、1875年には官営・深川セメント製造所（後の浅野セメント）においてコンクリートの原料になるセメントの製造が開始された。その後コンクリートは、産業と生活の中に深く浸透しており、産業基盤を支える鉄道、道路、港湾・河川や生活基盤を支える上下水道施設、および建築物でもその多くがコンクリートで製造される様になった。

近年における我が国の生コンクリートの出荷数量²⁾を図1.1に示す。平成12年度の生コンクリートの出荷数量は149,480千 m^3 であり、平成26年度には94,010千 m^3 まで減少したが、依然として構造物を製造する材料として重要である。コンクリートは、前述した様に構造物の主要部分を担う材料であり、現在のコンクリートの配合もセメント、骨材（粗骨材、細骨材）、砂、水とほぼローマ帝国時代と変わらない複合材料で構成されている。現



写真 1.1 パルテオン(上)とカラカラ浴場(下)

代のコンクリートは、ローマ帝国時代と違い型枠に流し込み、形状を自由に設計できることが可能で、鉄筋と複合させることで引張力に弱いコンクリートも鉄筋コンクリートとして引張力にも耐えることができる。さらに、硬化後のコンクリートは数十年間安定した構造体であることから、石炭灰や高炉スラグ、製紙スラッジなどの工業副産物（廃材）を混合した材料として利用できる様になった。我々の今日の生活を支えていると言っても過言でないコンクリートであるが、コンクリートに利用される材料の骨材などは川砂利の採取が禁止され、一部の近海では海砂の採取も難しい課題を抱えている。

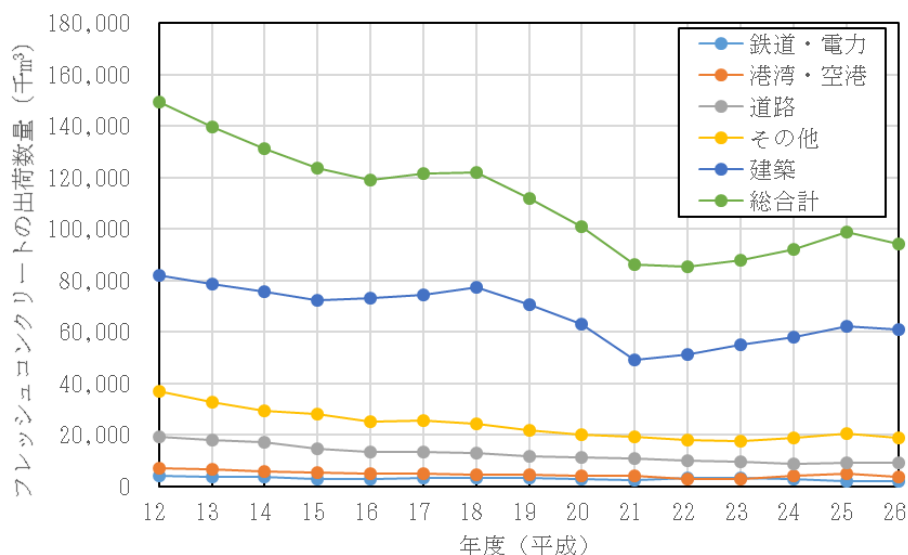


図 1.1 生コンクリートの出荷推移

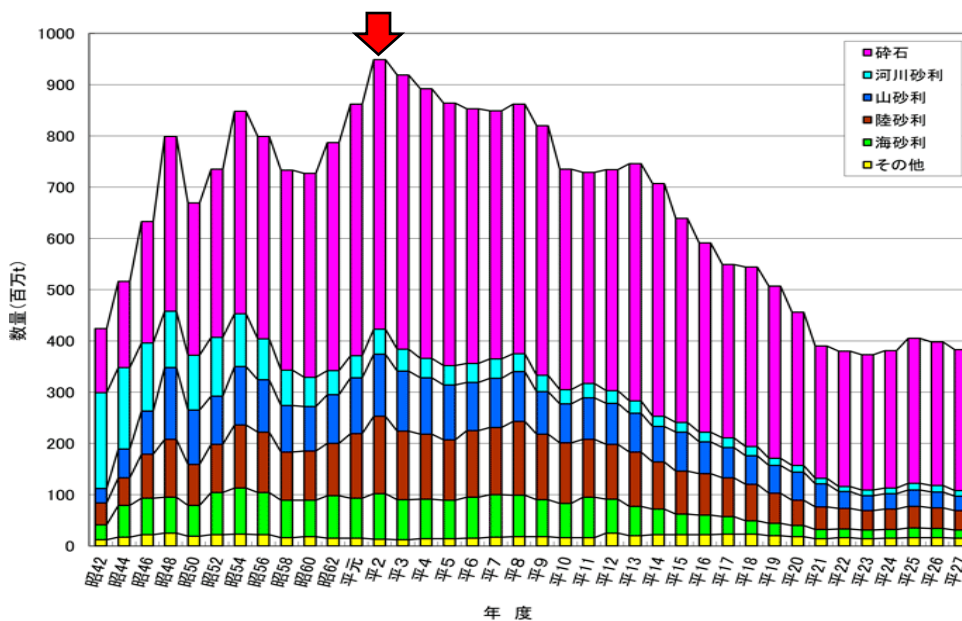


図 1.2 骨材供給構造の年度ごとの推移図

1.2 コンクリートの骨材について

採取された骨材は、コンクリートや道路敷材、埋め戻し用の材料として広く利用されている。骨材の需要について一般社団法人日本採石協会の骨材需要の推移³⁾からは、戦後の

高度経済成長が始まる 1965 年頃（昭和 40 年）までは骨材の使用量も少なく、骨材の殆どは河川砂利により供給されていた。しかし、使用量が増えるにつれて橋脚の洗掘などの問題が生じ、河川砂利の採掘は規制されるようになった。そこで、高度経済成長に伴って急増する需要を満たすために、陸砂利・山砂利・海砂利・砕石などの代替資源の開発が進められた。この結果、各種砂利の年間総供給量は約 3.5 億トンまで増加し、急増する需要を支えたと言える。さらに不足分を補充するため砕石の生産が増加し、1980 年以降（昭和 55 年以降）で骨材の供給は砕石が主、砂利が従となっていった。骨材使用量は、1990 年（平

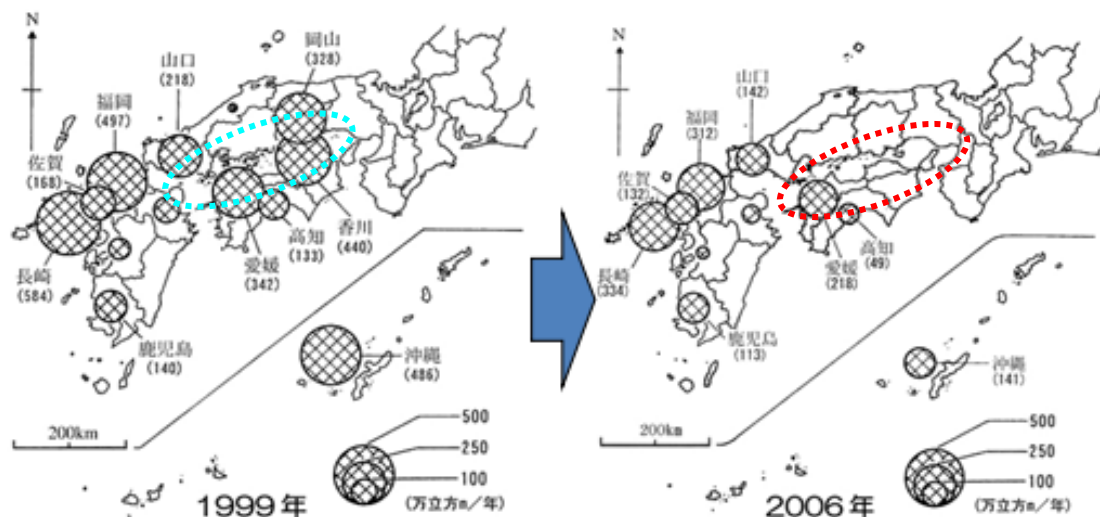


図 1.3 海砂利採取量の変化図

成 2 年、図 1.2 骨材供給構造の年度ごとの推移図の赤矢印）に 9 億 5,000 万トンとピークに達した。

図 1.3 に瀬戸内海と九州・沖縄近海の手砂利採取量の変化図⁴⁾を示す。1990 年以降になると環境問題が加速されて手砂利の採取が困難になり、特に 1999 年（図 1.3 の平成 11 年、青点線枠の地域）に瀬戸内海の手砂利採取の規制や禁止区域が設定され、2006 年（図 1.3 の平成 17 年、赤点線枠）には一部を除き全面禁止となった（徳島県では、1978 年に採取禁止）。九州でも自然保護を理由に採取認可量を低減している。近年、隣国の中国でも建設用資材としての骨材の輸出を制限している状況である。しかしながら、バブル経済の崩壊とともに新設の公共事業が減少して骨材需要は減少したため、環境の問題は一時的に軽減したと思われるが、砕石を掘削した跡地や海底の手砂利掘削場所の富栄養化の環境問題は現在でも継続している状況である（産業技術総合研究所、地圏資源環境研究部門、日本の骨材資源）。

1.3 再生骨材について

コンクリートに使用される骨材については、天然の骨材だけに頼らずにコンクリートとして利用された骨材についてもコンクリート構造物の解体に伴って発生するコンクリート塊を活用する動きが出来てきた。これらコンクリート塊は、これまで路盤材として主に用いられてきたが、コンクリートへの再利用に関しても重要な位置づけとなってきた。

我が国では、平成 3 年 4 月に再生資源の利用の促進に関する法律が施工され、限りある

資源が大量に廃棄されることを抑制し、リサイクルによる資源の有効利用の促進を図ることが求められるようになった。また、コンクリート塊などのコンクリート副産物の利用⁵⁾に関しては、コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準（案）として平成 6 年 4 月に建設省技調発第 88 号が示され、平成 12 年には国策として循環型社会の構築に取り組むための法案として「循環型社会形成推進基本法」が公布された。また、同時に関連法案も整備され、資源の有効な利用を確保する観点から、建設工事に伴って廃棄されるコンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材の建設廃棄物について再資源化を行い、再び利用していくための「建設リサイクル法」が制定された。その後、再生骨材を用いたコンクリートの品質に関する日本工業規格が平成 17 年から平成 19 年に定められ、再生骨材及びこれを用いたコンクリートの製品認証に関する指針案が日本コンクリート工学会から示された。また、平成 24 年には再生骨材 M、L を用いたコンクリートに関する日本工業規格（JIS A 5022、JIS A 5023）の改訂が行われ、再生骨材 M を利用した再生骨材コンクリートの標準品に対して凍結融解抵抗性を持つ耐凍害品が設定されることになった。一方、再生骨材の中でも再生骨材 H は、再生骨材 M、L よりも先に JIS A 5021 で規格化され、通常のレディーミクストコンクリート（JIS A 5308）の使用材料に含まれている。

1.3.1 再生骨材を使用したコンクリートの品質について



図 1.4 再生骨材の製造フロー図

再生骨材は、図 1.4 に示す様に目標の品質に応じて再生骨材の製造方法⁶⁾が考案されている。再生骨材の製造方法としては、解体されたコンクリート構造物からコンクリート塊をジョークラッシャーで一次処理し、その後の工程として再生骨材の目標水準の品質に応じて、ふるい分け等の簡易処理で製造する方法から高度な二次処理を施して再生骨材の品質を向上させる方法がある。再生骨材は、製造工程で除去出来なかった再生骨材の表面に付着しているモルタル等の付着物により普通骨材よりも吸水率が高くなることが知られている。この付着物を完全に除去するには、高度な処理を施す必要があり、製造コストが普通骨材の製造コストよりもさらに高価になってしまう。

日本工業規格には再生骨材の物理的性質の基準として、再生骨材 M には表 1.1、再生骨材 L には表 1.2 が示されている。また、再生骨材の品質を一定に保つため、不純物の除去やバラツキの少ない骨材品質の確保が製造プラントに求められる。

表 1.1 再生骨材Mの物理的性質

試験項目	再生粗骨材M	再生細骨材M
絶乾密度 (g/cm ³)	2.3 以上	2.2 以上
吸水率 (%)	5.0 以下	7.0 以下
微粒分量 (%)	1.5 以下	7.0 以下

表 1.2 再生骨材Lの物理的性質

試験項目	再生粗骨材L	再生細骨材L
吸水率 (%)	7.0 以下	13.0 以下
微粒分量 (%)	3.0 以下	10.0 以下

再生骨材は、表 1.1、表 1.2 に示す様に吸水率が高い骨材であることから、普通骨材を使用したコンクリートと同じような耐久性や施工性能を示すことが難しいとされている。特に再生骨材コンクリートの圧縮強度の低下や凍結融解抵抗性の低下に関しては、顕著に表れる。また、施工性能に関しても材料分離等を起こしやすい。既往の研究においても、再生骨材を使ったコンクリートの施工性能に関する研究成果の報告は少ない。

1.4 高炉スラグ骨材について

高炉スラグ⁷⁾をコンクリート材料の粗骨材、細骨材として利用する取り組みは、1970 年から行われ 1977 年には JIS A 5011「コンクリート用高炉スラグ粗骨材」、1981 年には、JIS A 5012「コンクリート用高炉スラグ細骨材」が規定され、その後、JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材 第一部：高炉スラグ骨材」として統合されている。その後、土木学会と日本建築学会から高炉スラグ骨材をコンクリート材料に利用するための設計・施工に関わる技術基準が規定された。

高炉スラグ骨材は、十分な管理下で製造されている工業製品と言え、コンクリートに影響がある有機不純物等が混入することは少ない人工骨材である。高炉スラグは、鉄鋼の製造過程で発生するスラグで、製鉄工程から作られる。スラグは、生成フローの違いにより高炉水砕スラグ、高炉徐冷スラグ、転炉系のスラグに大別される。高炉水砕スラグは、高炉から取り出されたばかりのスラグを約 1500℃の熔融状態で加圧水を噴射し、急冷することにより水砕スラグとなる。この高炉水砕スラグは、潜在水硬性を持つことからコンクリート用の細骨材として利用される。また、高炉徐冷スラグも粗骨材として利用される。

①高炉スラグ細骨材の特徴について

高炉スラグ細骨材は、セメント中のアルカリ成分との反応によって溶出するシリカ量は 1mmol/L 程度で有り、アルカリ骨材反応の危険性がない。しかし、高炉スラグ細骨材は、高炉水砕スラグを加工した物で有り長期間の保存時にはアルカリ成分である Ca^{2+} イオンを溶出させて固結する性質を示し、気温の高い夏季の保管時に起こりやすいとされている。この固結を防止するためにオキシカルボン酸塩系化合物やポリアクリル酸塩系化合物の固結防止剤が使われている。この固結防止剤を散布された高炉スラグ細骨材を使用したコン

クリートは 60 分程度の凝固遅延が発生する事があるとされている。

②高炉スラグ粗骨材の特徴について

高炉スラグ粗骨材は、細骨材と同様に天然剤に近い性能を有しており、溶融シリカ量が少なくアルカリ骨材反応を起こしにくい骨材である。ただし、高炉スラグ粗骨材は、普通砂や骨材と比べて吸水量が大きくなる傾向があり、高炉スラグ細骨材を生コンクリートで使用する場合は、所定のワーカビリティを得るために骨材の吸水量に留意する必要がある。また、高炉スラグ粗骨材の内部は空隙を有しており普通骨材を使用する時と比べて骨材修正係数を 1~2%大きくする必要がある。

既往の研究では、普通骨材に高炉スラグ骨材を混合させた報告が多く見られるが、本研究の様に再生骨材と高炉スラグ細骨材を混合させて施工性能や耐久性を検証する既往の研究成果や報告例が少ない状況である。

1.5 研究の目的

前説に記述した通り、天然骨材を利用する場合には、天然骨材の採取による環境破壊等の問題があり、社会資本を今後も永続的に維持する為には天然骨材に代替される材料の確立が急務になってきていると考える。さらには、東北大震災に匹敵する地震規模の東南海地震の発生の確率が年々高まってきており、東南海地震の被害地域として中部地区、阪神地区、中国・四国地区の建設構造物が多大な被害を受けた場合の廃棄物量は、東北大震災の規模を遙かに超えると予測される。

そこで、本研究では、既に構造物等に使用している骨材の再利用について着目し、再生骨材コンクリートの施工性能や耐久性が普通骨材を使用したコンクリートと同等となる方法として高炉スラグ細骨材を混和させたコンクリートを考案する。特に、冬季に氷点下になる北海道や東北、北陸、山陰地方や四季を持つ日本においては、再生骨材コンクリートにおける凍結融解抵抗性の検討は優先度が高いと考えている。また、再生骨材コンクリートを型枠に打設した場合のワーカビリティの検証については、スランプ試験だけでなく間隙通過性試験等からも検証することにより、現場における施工不良を低減させることが出来ると考えている。さらに、再生骨材を利用することからアルカリ骨材反応に対する対策も必要となると考える。しかしながら、アルカリ骨材反応を有する再生骨材を実験の為に取得することが難しい状況もあり、再生骨材を利用する場合にアルカリ骨材反応を抑制する対策として、一般的に普及している高炉セメントを利用した再生骨材コンクリートを検討し、その施工性能や耐久性を検証する。

本研究テーマに関しては、再生骨材を用いたコンクリートの耐久性や硬化性状に関する既往の研究論文は多い。しかしながら、施工性能について検証された既往の研究成果や報告例が少ない状況である。さらには再生骨材と高炉スラグ細骨材を利用した再生骨材コンクリートについての研究等の報告例も少ない状況である。その為、本研究が今後の再生骨材コンクリート利用のモデルケースとなると考えている。

1.6 本論文の構成

本論文は、以下のように全 6 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景や研究の目的について述べると共に、本論文の構成を示した。

第2章では、再生骨材コンクリートの耐久性や施工性能の検証に関する既往の研究について取りまとめた。

第3章では、ポルトランドセメントを使用し低度処理再生粗骨材に高炉スラグ細骨材の混合量を変化させて製造した低度処理再生粗骨材コンクリートの施工性能について検証した結果について述べた。

第4章では、ポルトランドセメントを使用し低度処理再生粗骨材に高炉スラグ細骨材の混合量を変化させて製造した低度処理再生粗骨材コンクリートの耐久性について検証した結果について述べた。

第5章では、高炉セメントB種を使用し低度処理再生粗骨材に高炉スラグ細骨材の混合量を変化させて製造した低度処理再生粗骨材コンクリートの施工性能や耐久性について検証した結果について述べた。

第6章では、本研究の結論および今後の展望について述べた。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー131、古代ローマコンクリート ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析、2009.4
- 2) 全国生コンクリート工業組合連合会 HP：生コンクリート製造業の概要、
URL：<http://www.zennama.or.jp/3-toukei/gaiyou/index.html>
- 3) 一般社団法人日本採石協会 HP：骨材供給構造の推移、
URL：<http://www.saiseki.or.jp/kotsujukyu.html>
- 4) 産業技術総合研究所地圏資源環境部門：平成19年度骨材資源調査報告書「Ⅱ.骨材流通の概要と変化 ―骨材調査のまとめに代えて―」、pp.44-46、2008.3
- 5) 国土交通省 HP：コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準、pp.1-14、2016.3
URL：<http://www.mlit.go.jp/tec/hasseido.html>
- 6) 土木学会編：コンクリートライブラリー120、電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針（案）、pp.87-105、2005.6
- 7) 山中量一：高炉スラグ骨材、コンクリート工学、Vol.46、No.5、pp.90-94、2008

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

前章でも述べた様にH級以外の再生骨材の吸水率は普通骨材よりも大きい。一般的に、再生骨材コンクリートの圧縮強度、凍結融解抵抗性、施工性能は、普通骨材コンクリートのそれらよりも性能が劣る。性能低下の程度は、再生骨材の種類と普通骨材や骨材以外の構成材料の組み合わせや配合によって大きく異なる。H級の再生細・粗骨材以外の再生骨材コンクリートは、主要構造体のコンクリートに使用することは難しいと考えられてきたのがこれまでの見解である。

本章では、再生骨材を用いたコンクリートにおける耐久性、施工性についてまとめた。また、再生骨材コンクリートに混和材として使用した高炉スラグ細骨材を混合した場合の既往の研究についてもまとめた。

2.2 再生骨材を用いたコンクリートの耐久性における既往の研究

片平¹⁾らは、再生骨材コンクリートの課題の一つである凍結融解抵抗性について着目し、凍結融解抵抗性に優れた再生骨材を選別する方法として、再生骨材の凍結融解抵抗性試験法について検討した。その手法は、ふるい分けた表面乾燥状態の再生骨材を容器に入れて、その容器を水に浸した。その後、その容器を冷凍庫に入れて完全に凍結させ、凍結後に冷凍庫から出して容器のまま20℃の水槽に入れ、中の氷が融解するまで水槽に置いた。冷凍庫の工程と水槽に入れる工程を10回ほど繰り返した後、容器から取り出した再生骨材の表面の水分をウェスなどで除去し、粒度分布を測定して試験前後の粒度分布における各粒度の体積変化から凍結融解損出率を測定した。また、実験に用いたそれぞれの再生骨材を再生骨材コンクリートにして、JIS A 1148 (A法)により凍結融解抵抗性を評価した。

試験前後の粒度分布における各粒度の体積変化を比較した凍結融解損出率では、試験数が少ないものの、骨材の凍結融解損出率が10%を超えるものについては、再生骨材コンクリートの耐凍害性が低くなると述べている。さらに、骨材の安定性試験(JIS A 1122)の結果と再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性についても比較しており、骨材の安定性試験での結果が再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性について評価することが、困難であったと述べている。一方、原コンクリートがAEコンクリートとNon-AEコンクリートについても、同評価方法にて検証し、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は、原コンクリートの空気量と水セメント比に大きく関係しており、原コンクリートがAEコンクリートであれば凍結融解抵抗性は高くなるが、Non-AEコンクリートの場合には水セメント比が高いものほど低下する傾向を示したと述べている。

菊池²⁾らは、再生骨材として吸水率4～5%の再生粗骨材と普通粗骨材の2.5～3.5倍の吸水率の細骨材を用いて、水セメント比25、35、45、55、および65%の再生骨材コンクリートの耐久性を検証した。再生骨材の置換率は、再生粗骨材と再生細骨材をそれぞれ15%と30%に置換したもの、再生粗骨材を100%置換した3種類とした。

圧縮強度に関しての再生骨材の種類における影響は、水セメント比25～65%の各平均値で普通コンクリートに対して90%以上の強度が得られ、水セメント比45～55%の範囲では、ほぼ同等の強度が得られたと報告している。再生骨材の置換率の影響につい

ては、細・粗骨材ともに 30 % 置換した場合において若干低下する傾向がみられたものの相対的にはそれほど顕著ではなかった。また、水セメント比 45 % に限定すれば、粗骨材を全量置換した場合において高い強度が得られたと報告している。

中性化深さに関しては、普通コンクリートと同程度であった。しかし、水セメント比が中性化深さに及ぼす影響については顕著であった。これは、再生骨材コンクリートの中性化深さが普通コンクリートと同程度であった理由として、今回の実験では単位セメント量が多いことによるものと報告している。

凍結融解抵抗性に関しては、水セメント比 55 % の場合に再生コンクリートの耐久性指数は、300 サイクル時でいずれも 90 % 以上の値であり、普通コンクリートと同等であったと報告している。

後藤ら³⁾は、再生骨材を製造しているプラントが主に路盤材に使用する目的で製造していることに着目して、再生粗骨材の最大寸法を 40mm として再生骨材コンクリートの耐凍害性について検証している。研究に用いた再生粗骨材の吸水率は、5.86～6.66%であった。水セメント比は 45%とし、再生粗骨材への置換率は、50、70、および 100%としている。ただし、置換率を 100%としたものに関しては、水セメント比の 35、45、および 53%を追加した。

凍結融解抵抗性に関しては、100%置換した場合において耐久性指数が 300 サイクル時で 60%を下回ったと報告している。また、水セメント比と吸水率の関係性を示しており、データにバラツキがあるものの、再生骨材が製造プラントで適切に管理されれば水セメント比と再生粗骨材の吸水率に相関がとれる可能性があると報告している。

2.3 再生骨材を用いたコンクリートの施工性能における既往の研究⁴⁾

山田ら⁵⁾は、低品質再生骨材の吸水率や含水状態がコンクリートの性状に与える影響について、強度や耐久性においては研究が行われているものの圧送性やその他の施工性能に関する研究が十分に行われていないとし、再生骨材の使用割合と含水状態が圧送性、間隙通過性、材料分離抵抗性、強度に与える影響について報告している。そこでは、骨材の含水状態の影響を検証するため、気乾状態の再生粗骨材と湿潤状態の再生細骨材を使用している。水セメント比は 56%、再生骨材の置換率は、再生粗骨材を 50%置換、再生粗骨材と再生細骨材をそれぞれ 50%置換、再生粗骨材と再生細骨材を 100%置換したものを検討している。試験方法は、スランプ試験（JIS A 1101）等のフレッシュ性状試験の他に、高流動コンクリート充てん装置を用いた間隙通過試験方法（案）（JSCE-F511）を取り入れて評価している。施工性能の評価としては、練り混ぜ後のスランプ試験と間隙通過試験結果に着目した。

スランプ試験における経時変化では、練り上がり直後のスランプでは所定のスランプ値を得たが、再生粗骨材を気乾状態で使用したスランプ値の低下が著しかったと報告している。また、間隙通過速度は圧送前では骨材の含水状態の違いによる影響は見られなかったが、圧送後では骨材の含水の状態の違いが現れ、表乾状態の再生粗骨材を使用した RG50 と気乾状態での再生粗骨材を使用した RG50(気)を比較すると、RG50(気)の方が 10mm/s 程度遅くなった。また、RG50RS50 と湿潤状態の再生細骨材を使用した RG(気)RS(湿)では、RG(気)RS(湿)の方が 2 倍程、間隙通過速度が速くなったと報告している。

2.4 再生骨材と混和材を混合した再生骨材コンクリートの耐久性における既往の研究⁶⁾

平田ら⁷⁾は、再生骨材を使用したコンクリートは、再生骨材の吸水率が高く強度および耐久性を低下し、特に耐凍害性に関しては AE 剤の使用により適切な気泡を連行しても低下するとし、再生骨材を使用したコンクリートの耐凍害性の向上を目的にフライアッシュを内割 40%置換と細骨材の全量を高炉スラグ細骨材に置換したもの、およびその両方を同時に実施したもので実験を行っている。水セメント比は 39%、使用した再生骨材の含水率は 3.67%であった。

凍結融解抵抗性試験に関しては、再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を混和材として 100%置換したもの、再生粗骨材とフライアッシュを混和材として 40%の内割置換したものは相対動弾性係数が 60%を下回ることは無かった。しかし、再生粗骨材とフライアッシュ（内割 40%置換）と残りの細骨材を高炉スラグ細骨材に置換したものは、相対動弾性係数が 60%を下回ることになったと報告している。これは、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性はアルカリが刺激剤として効果を示すが、フライアッシュを内割 40%混合させたことでセメント量が減少したことや、フライアッシュのポゾラン反応により水酸化カルシウムが消費されたことによって潜在水硬性の効果が発現されなかったとしている。

また、綾野ら⁸⁾は、AE 剤を用いないコンクリートに混和材として高炉スラグ細骨材を用いて、蒸気養生しても凍結融解抵抗性を向上させることを検証している。通常のコンクリートでは骨材界面に多くの水酸化カルシウムが析出し、それが低温下では骨材界面に析出した水酸化カルシウムが水に溶けやすくなり、その空隙に水が溜まり凍ることで膨張圧が生じて粗骨材周辺にひび割れが生じる。そこで、反応性が高い非晶質の高炉スラグ細骨材を混合させることで、骨材界面に析出する水酸化カルシウムを抑えることができると報告している。

2.5 再生骨材コンクリートの課題について

既往の研究を整理した結果、H 級以外の低度処理再生骨材を用いたコンクリートの問題としては、以下に示す課題があることが明らかになった。

- 1) 圧縮強度に関しては、水セメント比を小さくすることによって配合強度を設定することが可能である。また、中性化に対しては、普通骨材コンクリートと同等である。乾燥収縮に対しては、単位水量を小さくすることで、目標の収縮ひずみ以下に制御可能であり、普通骨材コンクリートと比較して性能が劣ることはない。しかしながら、凍結融解抵抗性は、AE 剤を用いても普通骨材コンクリートと同等、もしくはそれ以下となり、凍結融解試験によって 300 サイクルの繰り返し回数で相対動弾性係数 60%以上を確保することは難しい。
- 2) 普通骨材コンクリートの施工性能に関しては、施工性能の定量的評価手法が最近提案されてこともあり、再生骨材コンクリートの施工性能の定量的評価は未だ明らかになっていない。

参考文献

- 1) 片平 博、渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、2005.7

- 2) 菊池雅史、道正泰弘、安永 亮、江原恭二、益田 彰：再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集 第 474 号、pp.11-20 (1995)
- 3) 後藤 彰、堺 孝司：再生骨材を用いたコンクリートの耐凍害性と乾燥収縮、コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1105-1110、1997.7
- 4) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ No.54、フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 (II)、2003
- 5) 山田悠二、橋本親典、江本幸雄、伊達重之：低品質再生骨材の含水状態がコンクリートの圧送性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1465-1470、2013.7
- 6) 土木学会編：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会報告書、コンクリート技術シリーズ 102、2013
- 7) 平田大希、橋本親典、横井克則、渡邊 健：多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.38、No. 1、pp.1785-1790、2016.7
- 8) 綾野克紀、藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.70、No.4、pp.417-427、2014

第3章 高炉スラグ細骨材を混和し低度処理再生粗骨材を全量使用した再生骨材コンクリートの施工性能に関する一考察

3.1 概 説

3.1.1 はじめに

我が国では、コンクリート構造物を解体した際に発生するコンクリート塊の9割以上が道路用路盤材や埋戻し材などとして再利用されている。しかしながら、高度経済成長期に建設された建築物は、その多くが寿命を迎えることになり、古い構造物を補修・補強しながらライフサイクルを延長するか、新設として新しい構造物を建設することを迫られることになる¹⁾²⁾。さらに、高橋ら³⁾は、我が国の資材としてセメント、骨材、鉄鋼、木材やアスファルトなどの建設資材は、総資源投入量の約50%が国内備蓄とされており、我が国で消費される資源の半分が土木建築の構造物として蓄積され、特に骨材は道路用骨材が約3億トンの他、コンクリート用骨材として約6億トン以上が蓄積されていると報告している。また、建設材料としてのコンクリートは、その低価格の為にリサイクル・リユースには難しい建設資材であることは否めない。それ故、高度な二次処理が必要で微粉末などの産業廃棄物を産生してしまう再生骨材Hを使用するのでは無く、簡易な一次処理で再びコンクリートの骨材として利用できる再生骨材Mなどの利用が望まれている。しかしながら、再生骨材の利用に関する研究開発は進んでいるものの、コンクリート塊の処理状況により品質にバラツキが発生したり、再生骨材の吸水率が高いことによる施工性能や耐久性の課題が明確にされていない。さらに、構造物の主要部材は、高機能化による密な鉄筋配置によりフレッシュコンクリートの十分な施工性能を確保する必要性が高まっているが、再生骨材コンクリートを用いた場合の施工性能について十分に検討されていない現状がある。

近年になって、コンクリートは硬化すると安定した材料であることから、産業副産物由来として石炭火力発電所などから排出されるフライアッシュや製鉄所から排出される高炉スラグ等の各種スラグ骨材を混和材として利用することが進められてきた。特に、高炉スラグ細骨材は、昭和56年にJIS A 5012として認定され、さらに日本建築学会、土木学会の指針にも定められており。最近では、JIS A 5011-1（コンクリート用スラグ資材）として改定され、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）にも規定されている天然骨材の代替品として、一般的な建設用資材における活用が進んでいる。

第2章でも述べたが、綾野らの研究成果⁴⁾では、高炉スラグ細骨材を使用することによりAE剤を使用することが無くとも骨材とモルタルとの界面に水酸化カルシウムの発生を抑えることが確認でき、凍結融解抵抗性に関して普通コンクリートと同等の結果が得られたことを報告している。一方、平田らの研究成果⁵⁾では、粗骨材に低度処理再生骨材（原コンクリートが高強度コンクリートであるコンクリート塊を破砕し、鉄くずや木くずなどを取り除いた後にふるい分けをおこなった、密度は再生骨材M、吸水率はLに相当する骨材）を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を全量混和した高強度域のコンクリートの配合条件（W/C=39%）において、凍結融解抵抗性が得られることを示せた。しかし、セメントリッチな高強度域のコンクリートの配合設計による施工性能や凍結融解抵抗性については検証できたが、普通コンクリートの強度域における配合条件で低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を混和させた再生骨材コンクリートの施工性能についての報告はできていない。

さらに、既往の研究成果においても、高炉スラグ細骨材を混和させた再生骨材コンクリートの施工性能に関する報告は見当たらない。そこで本章では、再生粗骨材を全量用い細骨材には高炉スラグを置換した普通コンクリートの強度域での再生骨材コンクリートの施工性能について検討した。

3.1.2 高炉スラグ細骨材について

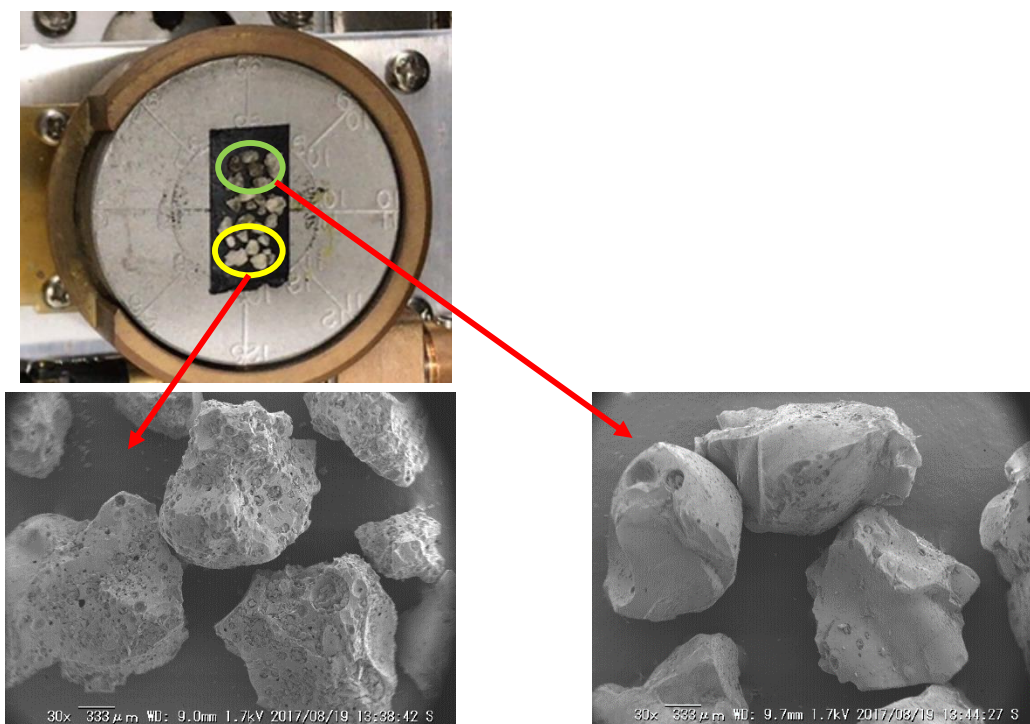


写真 3.1 高炉スラグ細骨材 (BFS1.2)



写真 3.2 高炉スラグ細骨材 (BFS5)

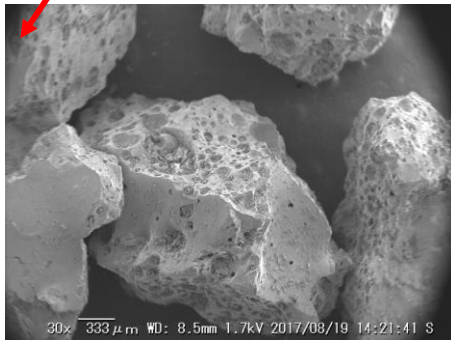
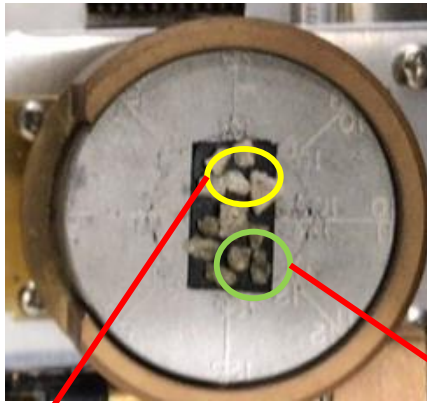
本実験で使用した高炉スラグ細骨材の**写真 3.1、3.2**、高炉スラグ細骨材の電子顕微鏡写真（キーエンス社：3D リアルサーフェスビュー顕微鏡 VE-9800）を**写真 3.3、3.4**に示す。高炉スラグ細骨材の表面を観察すると白っぽい部分と黒っぽい部分が混在しており、その部分を電子顕微鏡で観察したところ、白っぽい部分は骨材表面にある微細なくぼみが多数見られた。また、黒っぽい部分は微細なくぼみが少なく平らな状況であった。これは、骨材表面のくぼみが多いことにより表面で光が乱反射して白っぽく見え、骨材表面にくぼみが少なく平らな部分では、そのまま光を反射するので骨材自体の色が観察できていると考えられる。



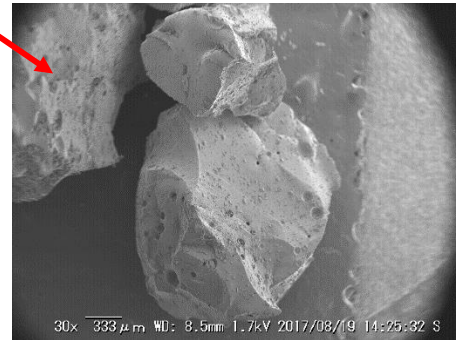
表面が白っぽい BFS1.2

表面が黒っぽい BFS1.2

写真 3.3 BFS1.2 の骨材表面の電子顕微鏡写真



表面が白っぽい BFS5



表面が黒っぽい BFS5

写真 3.4 BFS5 の骨材表面の電子顕微鏡写真

3.1.3 低度処理再生粗骨材について

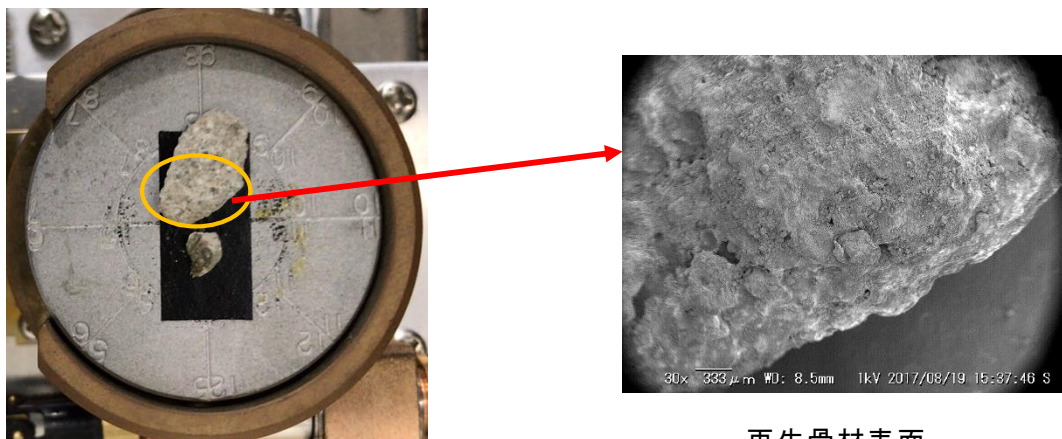


写真 3.5 低度処理再生粗骨材の写真



写真 3.6 普通粗骨材

本実験で使用した低度処理再生粗骨材を写真 3.5、普通粗骨材を写真 3.6 に示す。写真 3.5 から表面の白いモルタルなどの付着物があることがわかる。再生粗骨材は、低度処理再生骨材（原コンクリートが高強度コンクリートであるコンクリート塊を破碎し、鉄くずや木くずなどを取り除いた後にふるい分けをおこなった、再生粗骨材の密度は再生骨材M、吸水率はLに相当する骨材）を用いた。再生粗骨材の電子顕微鏡写真を写真 3.7 に示す。白黒写真ではわかりにくい部分もあるが、骨材表面のザラザラした部分は付着したモルタル分である。



再生骨材表面

写真 3.7 再生粗骨材の電子顕微鏡写真

3.2 実験概要

3.2.1 使用材料

使用材料の物性を表3.1、骨材の粒度分布を図3.1および図3.2に示す。高炉スラグ細骨材（以下、「BFS」と称す）は福山産のBFS5と倉敷産のBFS1.2の2種類を用いた。粒度分布は図3.1に示すように、BFS1.2はBFS5よりも粒度が細かい。低度処理再生粗骨材（以後、「RG」と称す）は、基礎PC杭を破碎、洗浄、ふるい分けして採取したものであり、粒度分布は普通砕石と同様である。

表3.1 使用材料の物性表

使用材料	記号	材料特性
普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³ 、比表面積:3400cm ² /g
普通砕砂	S	表乾密度:2.57g/cm ³ 、吸水率:1.77%、実積率:60.5%、F.M.:2.63
高炉スラグ細骨材（福山産）	BFS5	表乾密度:2.73g/cm ³ 、吸水率:0.30%、実積率:62.3%、F.M.:2.60
高炉スラグ細骨材（倉敷産）	BFS1.2	表乾密度:2.73g/cm ³ 、吸水率:0.40%、実積率:58.7%、F.M.:2.13
普通砕石	G	表乾密度:2.57g/cm ³ 、吸水率:1.62%、実積率:55.9%、F.M.:6.60
再生粗骨材	RG	表乾密度:2.43g/cm ³ 、吸水率:6.20%、実積率:54.8%、F.M.:6.58
高性能AE減水剤	Ad1	ポリカルボン酸エーテル系
AE剤	Ad2	高アルキルカルボン酸系

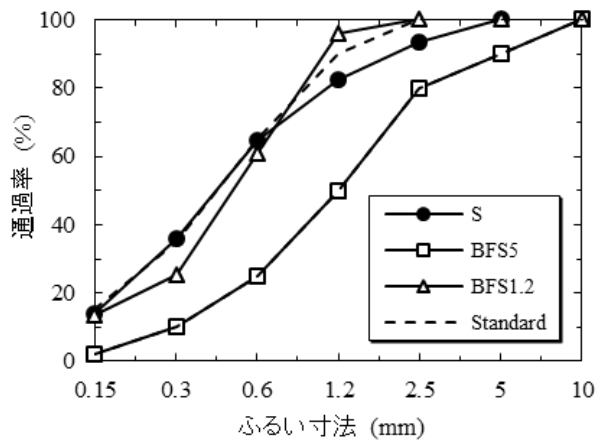


図3.1 細骨材の粒度分布図

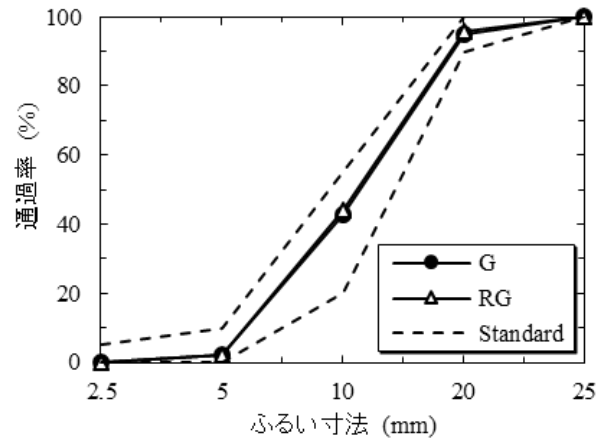


図3.2 粗骨材の粒度分布

3.2.2 フレッシュコンクリートのスランプと単位セメント量について

本章における単位セメント量とスランプは、図3.3に示した土木学会編「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針」⁹⁾に示されている密実な充填を達成するコンクリートの充填性の考え方を参考に導いた。フレッシュコンクリートの充填性は、スランプのみで決められるとは言い難く、流動性や材料分離抵抗性で示されると言える。本章では、普通コンクリートの強度域における配合として水セメント比を47%とし、単位水量を低度処理再生粗骨材を用い高炉スラグ細骨材を混合させることから、粉体の単位量を 350kg/cm^3 とスランプ値を $12.0 \pm 1.0\text{cm}$ とした。

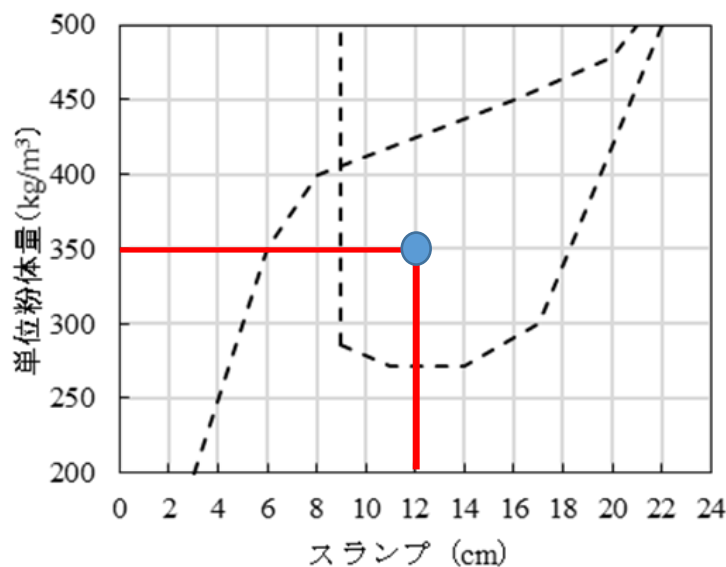


図3.3 スランプと単位セメントの関係図

3.2.3 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合を表3.2に示す。いずれの配合も、単位セメント量、単位水量、s/aを一定とした。配合名について、Nは骨材として普通砕石・砕砂のみを用いた配合である。Rは粗骨材にRGを用い、細骨材には普通砕砂を用いた。BFSを用いたコンクリートの配合名は「BFSの種類－容積混和率」とし、粗骨材としてRGを用いたものには末尾にRを示した。

コンクリートは、強制二軸練りミキサにより材料を3分間程度練り混ぜて作製した。BFS5を100%混和した場合は、目視で確認できるほど材料分離が著しかった。また、BFS5-100Rでは混和剤の添加量を調整しても、所定のスランプが得られなかったため、試験対象から除外した。

表3.2 コンクリートの配合表

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 (C×mass.%)		Sl. (cm)	Air (%)	C.T. (℃)	
			W	C	S	BFS5	BFS1.2	G	RG	Ad1	Ad2				
N	47	47	165	350	802	-		905	-	1.2	0.005	13.0	4.9	21.1	
BFS5-50					401	426						-	13.0	5.0	20.3
BFS5-100					-	852							11.0	5.0	20.2
BFS1.2-30					562		256					11.0	6.0	20	
BFS1.2-50					401		426					13.0	7.0	18.7	
R					802	-	-	-	855			11.5	5.0	20.2	
BFS5-50R					401	426						11.0	7.0	20.8	
BFS5-100R					-	852						2.5	5.0	19	
BFS1.2-30R					562		256					13.0	6.0	22	
BFS1.2-50R					401		426					13.0	5.5	21.1	

3.2.4 試験方法

(1) フレッシュ性状試験

スランプ試験はJIS A 1101、空気量試験はJIS A 1128に準拠して実施し、空気量試験に関しては、骨材修正係数の決定をJIS A 1128に準じて行った。なお、再生粗骨材を用いた場合は、細骨材のBFSの混和率に関係なく、骨材修正係数が1.0%であった。したがって、再生粗骨材を用いた場合の空気量は、骨材修正係数1.0%を減じた空気量とした。また、コンクリートの練上がり後の温度も測定した。

(2) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123-2012に従って行った。

(3) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験による間隙通過性評価は、JSCE F 701-2016「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験（案）」に従って試験を行った（以下、「間隙通過性試験」と称す）。試験装置の概要を図 3.3 に示し、以下に試験の実施要領を示す。ボックス形容器を防振マットの上へ水平となるよう設置し、仕切りを閉じた状態で試料をA室に3層に分けて詰めた。このとき、1層ごとにボックス形容器のB室アクリル板側を正面にして手前側と奥側に往復3回、軽く揺らした。その後、A室上面をこてで均し、停止した状態の棒状内部振動機（エクセン社製、φ28mm、周波数220～270Hz）をA室中央に底面から棒状内部振動機の先端までの高さが100mmとなるよう挿入した。仕切りを上げ、棒状内部振動機で加振を行い、B室側に試料を充填させた。加振開始からB室側に充填した試料の自由表面における最も高い部分の充填高さが、190mmと300mmに到達する

のを目視で確認してその時間を計測し、式【3-1】より間隙通過速度 V_{pass} (mm/sec.) を算出した。

$$V_{\text{pass}}(\text{mm/sec}) = \frac{300\text{mm} - 190\text{mm}}{T_{300}(\text{s}) - T_{190}(\text{s})} \quad \text{【3-1】}$$

ここに、

T300 : B 室における充填高さ 300mm 到達に要した時間(sec.)

T190 : B 室における充填高さ 190mm 到達に要した時間(sec.)

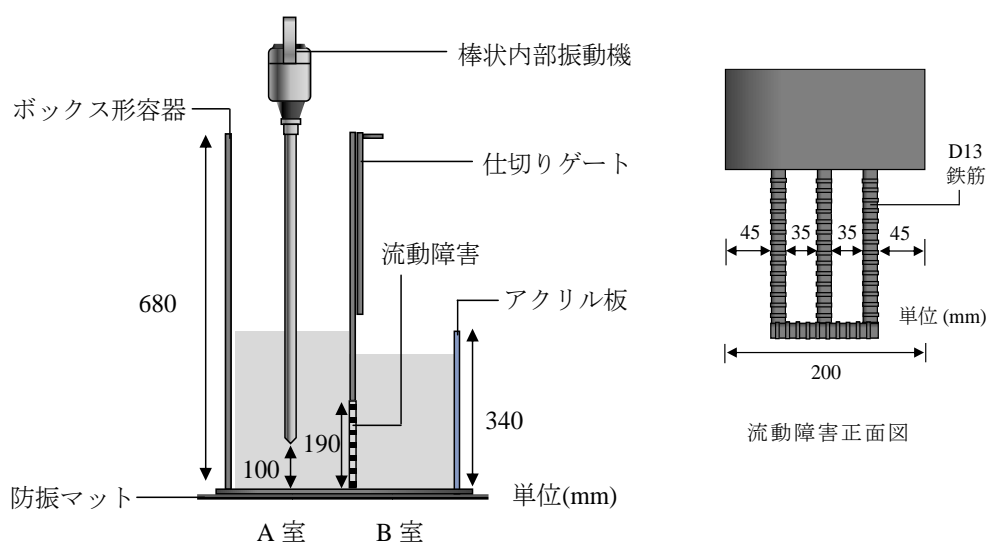


図 3.3 間隙通過性試験で使用した加振ボックス試験装置の詳細

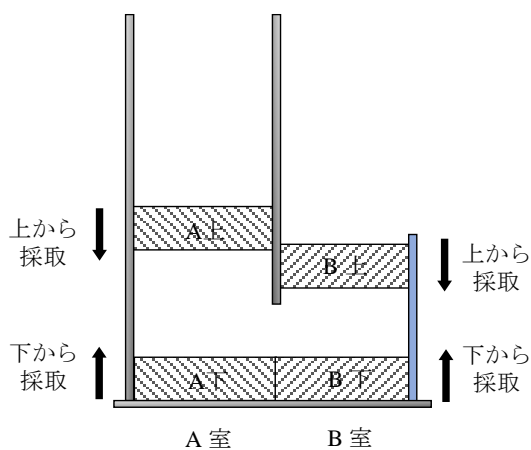


図 3.4 加振ボックス試験体試料の採取箇所

3.3 試験結果および考察

3.3.1 ブリーディング性状

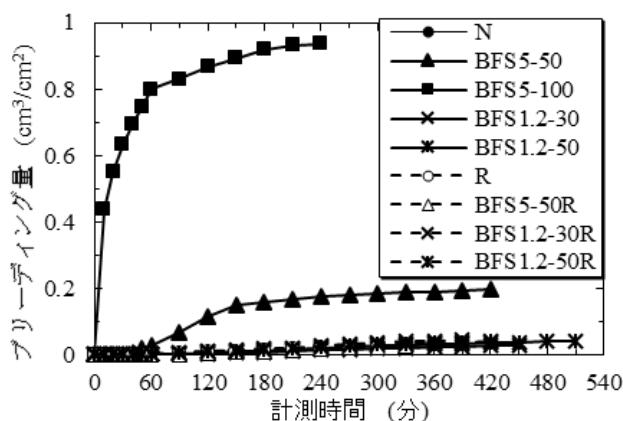


図 3.5 ブリーディング量

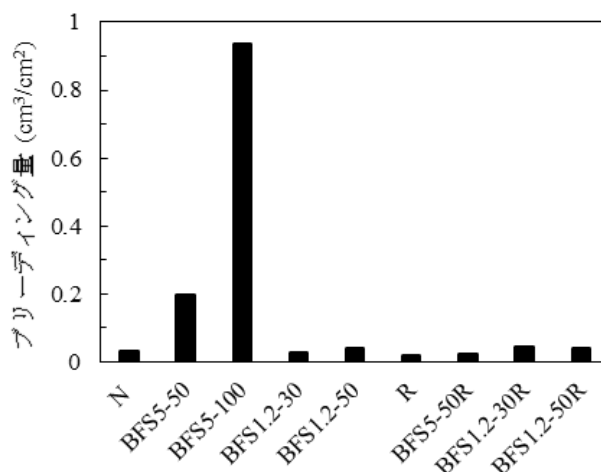


図 3.6 ブリーディング量の最終値

図 3.5 にブリーディング量と時間の関係を示す。ブリーディングの増加傾向に着目すると、BFS5-100 では 0～60 分までのブリーディング量の増加が大きくなった。BFS5-50 では、60 分以降にブリーディング量の増加が大きくなったが、BFS5-100 に比べると緩やかな増加傾向であった。また、BFS1.2 を使用した配合では、いずれの混和率の場合にも初期から終局まで緩やかに増加した。しかし、BFS5-100 は、ブリーディング量の上昇が速く 240 分で $0.9\text{cm}^3/\text{mm}^2$ に達した。なお、RG を用いた配合では、時間経過に伴いブリーディング量の著しい増加は見られなかった。

図 3.6 に終局ブリーディング量を示す。BFS を混和することで、ブリーディング量は増加するとされるが⁸⁾、BFS5-50 は鉄筋コンクリート構造物に適用できる範囲（日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」の品質規定、ブリーディング量 $\leq 0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ）であった。しかし、BFS5-100 では、ブリーディング量は品質規定を大きく上回る結果となった。また、BFS1.2 を用いた場合では、50%混和した BFS1.2-50 でも終局ブリーディング量が N と同程度であった。これは、BSF1.2 は粒度が細かいため、混和させたモルタルの粘性が高くなり、ブリーディングの発生を抑制できたと考えられる。

RG を用いた配合では、BFS の種類や混和率によらず、ブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 未満であった。これは、再生骨材表面の凹凸や、骨材表面に付着している微粒分によってブリーディング水が保水されたと考えられる。従って、低度処理再生骨材の場合は、BFS1.2 もしくは BFS5 を混和してもブリーディング量に影響しないことが示された。

3.3.2 間隙通過性状

図 3.7 には、間隙通過性試験における充填高さ 190mm と 300mm に到達するまでに要した加振時間、図 3.8 には間隙通過速度 (V_{pass}) を示す。R は間隙通過速度が全てのフレッシュコンクリートの中で遅く、特に 190～300mm の高さに達するまで多くの時間を要した。

これは、加振によりモルタルとRGに材料分離が発生したことが要因と考えられ、加振によるモルタルと骨材との材料分離の要因に関しては既往の報告⁷⁾にも示されている。また、BFS5を用いた場合は粗骨材の種類によらずBFS1.2を用いた場合ほど間隙通過速度は速くなかった。これは、BFS5の粒度が粗いことや、ブリーディングが発生しやすいため、加振により局所的なモルタルとBFS5を含む骨材群との材料分離が発生したためと考えられ、特にBFS5-100では加振開始直後からブリーディングが顕著に発生する様子が目視で確認できた。一方、BFS1.2の混和により、粗骨材種類によらず間隙通過速度は速くなった。山田らはこれまでに、フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの間隙通過性においても同様の傾向にあることを報告⁹⁾した。BFS1.2はBFS5より粒度が細かく、粗骨材同士の間に入りやすいことで、粗骨材間の衝突や鉄筋と粗骨材との衝突を緩和したことが間隙通過性の向上に寄与したと考えられる。また、BFSの様な普通砂よりも密度の大きい細骨材が粗骨材同士の間に入ることでフレッシュコンクリート中に振動が伝わりやすくなったことも示唆される。さらにRGとBFS1.2を併用した場合、普通粗骨材とBFS1.2を用いた場合よりも間隙通過速度は速くなった。要因としては、再生骨材表面の凹凸の部分をBFS1.2が埋めることで表面が滑らかとなったことや、練混ぜの段階で再生骨材表面がBFS1.2との衝突により摩耗し、滑らかになった可能性があると考ええる。

図3.9に間隙通過速度とブリーディング量の関係を示す。全配合で見ると、両者に相関性があるとは言いがたい。これは、ブリーディングが水の分離現象であるのに対し、間隙通過性へ支配的に影響するのはモルタルと粗骨材粒子群の分離であるためである。しかし、粗骨材の種類ごとに比較すると、普通粗骨材とBFSを用いた配合では、ブリーディング量が $0.2\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上となった配合において間隙通過速度が遅い傾向にあった。したがって、ブリーディングが特に多いものは、モルタルと粗骨材粒子群の分離も生じやすい配合であるといえる。一方、RやBFS5-50Rの様にブリーディング量が特に少ない配合でも、間隙通過速度が相当に遅い場合があるため、ブリーディングが少ない配合は間隙通過性が良好とは限らない。

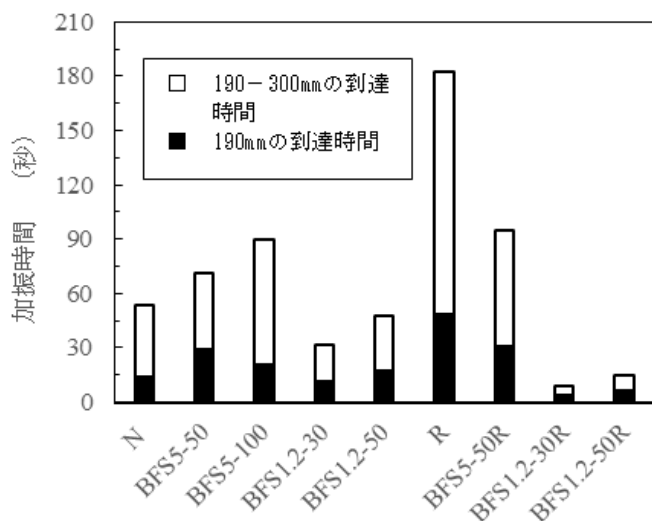


図3.7 間隙通過試験の充填時間

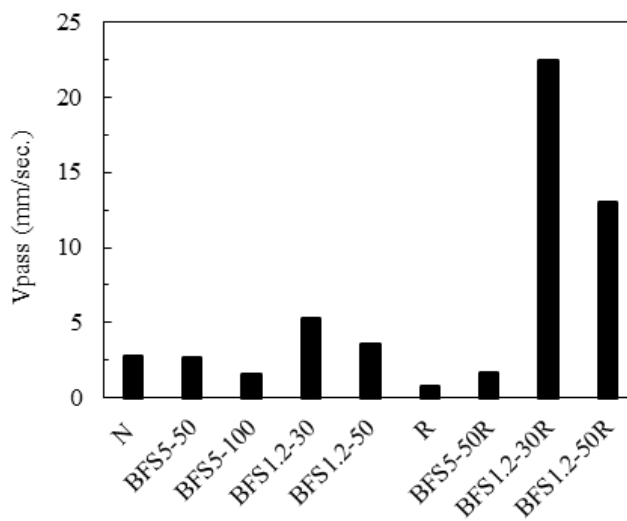


図3.8 間隙通過速度

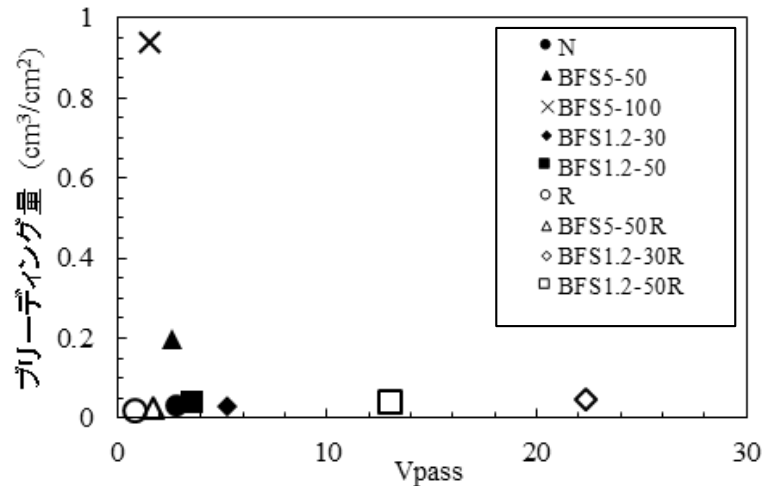


図3.9 ブリーディング量とVpassの相関図

3.4 第3章のまとめ

本章では、普通コンクリートの強度域における配合条件 ($W/C=47\%$) で、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材 (BFS5およびBFS1.2) を混和したコンクリートの施工性能について、以下に本章のまとめを示す。

- (1) コンクリート練り混ぜ後のスランプ、空気量に関しては、低度処理再生粗骨材を使用した場合のコンクリートやBFSを置換したコンクリートでも所定の数値を得ることができた。練り混ぜ終了時には、どの配合も材料分離が見られなかった。
- (2) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を同時に混和したコンクリートのブリーディング量は、高炉スラグ細骨材が無混合のものと同等に小さかった。
- (3) BFS5を100%置換したBFS5-100の終局ブリーディング量は、約 $0.9\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり日本建築学会の基準値を大きく上回る結果となったが、BFS5を50%置換したBFS5-50の終局ブリーディング量は $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となり、BFS5に関しては50%の置換まで、ブリーディング量を抑える事ができることがわかった。
- (4) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材 (BFS1.2) を用いたコンクリートの間隙通過性が向上した。
- (5) 間隙通過試験の結果から、低度処理再生粗骨材を使用したRは300mmに達する時間が182秒と長く、特に190mmから300に達するまでの加振時間は134秒と他の配合よりも長時間の加振を必要とした。よって、低度処理再生粗骨材を使用する際は、鉄筋周辺で発生が予測される材料分離や長時間のバイブレーションの加振によるブリーディングに注意が必要である。

(6) 間隙通過速度は、BFS1.2を使用した場合に粗骨材が低度処理再生粗骨材でもBFS1.2-30R、BFS1.2-50Rでは加振時間が短く、Vpassが前者の配合で22mm/秒、後者の配合では13秒とNを使用した配合よりも速い数値を得た。

(7) ブリーディング量とVpassの関係では、相関があると言い難い状況であった。終局ブリーディング量が高くともVpassに影響を与えることは少ないことがわかった。

参考文献

- 1) 北海道開発局編：再生骨材の最近の動向について、1) 北海道開発土木研究所月報、No.632、pp.29-33、2016.1
- 2) 野口 貴文：日本建築学会「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)」の概要、コンクリート工学年次論文集、Vol.53、No.2、pp.165-171、2015.2
- 3) 高橋 泰一、阿部 道彦：再生骨材のコンクリートへの適用の現状と将来、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.20-28、1995
- 4) 綾野 克紀、藤井 隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、土木学会論文集、Vol.70、No.4、pp.417-427、2014
- 5) 平田 大希、橋本 親典、横井 克則、渡邊 健：多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集Vol.38、No. 1、pp.1785-1790、2016.2
- 6) 土木学会編：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針、コンクリートライブラリー145号、2016
- 7) 土木学会編：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会報告書、コンクリート技術シリーズ102、2013
- 8) 堤嵩示、吉野公、黒田保、吉澤千秋：高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No. 1、pp.69-74、2016.2
- 9) 岡 友貴、山田 悠二、橋本 親典、渡邊 健：非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No. 1、pp.1033-1038、2015.2

第 4 章 普通コンクリートの普通強度域配合条件における高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性に関する一考察

4.1 概説

4.1.1 はじめに

第 1 章で述べたように、良質な川砂利等の天然骨材の枯渇化や環境破壊に繋がる海砂採取の禁止により、構造物解体で産出されるコンクリート塊からの再生骨材の有効利用が望まれている。コンクリート塊の多くは道路用路盤材や埋戻し材として再利用されているが、再生骨材のコンクリート用骨材としての利用は極一部に限られている。これは、各研究機関により再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性評価に関する研究¹⁾は進められてきたものの、再生骨材や再生骨材コンクリートの特性が十分に解明されていないことが影響していると考えられる。

現在、コンクリート用の再生骨材は H、M、L に分類されている。特に再生骨材 H は、日本工業規格（以後、「JIS」と称す）の JIS A 5021 に再生骨材 H として規定され、通常のレディーミクストコンクリート（JIS A 5308）への使用が認められている。その品質は普通骨材と同等であるが、骨材表面に付着しているセメント微粉を除去する為に製造コストが高価となり微粉末などの産業廃棄物を産生してしまう。また、再生骨材 H より製造コストが安価な再生骨材 M、L についても JIS A 5022、JIS A 5023 に再生骨材 M もしくは L を用いた再生骨材コンクリートとして規定されたが、その使用用途は制限されている現状がある。これは、再生骨材 M もしくは L を使用した再生骨材コンクリートの強度、凍結融解抵抗性等に関して普通骨材を用いたコンクリートよりも低下する傾向を示すことが要因である。特に再生骨材の品質によって、再生骨材コンクリートの性状に大きな影響を及ぼすことが報告²⁾されている。

我々のコンクリート研究室では、再生細骨材を全量と普通粗骨材を全量使用し、フライアッシュを質量内割 40% で混和した場合において凍結融解抵抗性の向上が確認できなかったが、平田らの研究成果³⁾では、粗骨材に低度処理再生骨材（原コンクリートが高強度コンクリートであるコンクリート塊を破碎し、鉄くずや木くずなどを取り除いた後にふるい分けをおこなった、密度は再生骨材 M、吸水率は L に相当する骨材）を用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を全量混和した高強度域のコンクリートの配合条件（W/C=39%）において、凍結融解抵抗性が得られることを示せた。しかし、セメントリッチな高強度域のコンクリートの配合設計による凍結融解抵抗性の向上については検証できたが、普通コンクリートの強度域における配合条件で低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を混和させた再生骨材コンクリートの耐久性についての報告はできていない。

そこで本章では、平田らが使用した低度処理再生骨材と同じ出所のコンクリート塊を低度処理し、採取した低度処理再生粗骨材と細骨材に高炉スラグを混和させた普通コンクリートの強度域での再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性について検討した。

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料

使用材料の物性を表 4.1、骨材の粒度分布を図 4.1 および図 4.2 に示す。第 3 章と同様

に高炉スラグ細骨材（以下、「BFS」と称す）は福山産の BFS5 と倉敷産の BFS1.2 の 2 種類を用いた。粒度分布は図 4.1 に示すように、BFS1.2 は BFS5 よりも粒度が細かい。低度処理再生粗骨材（以後、「RG」と称す）は、基礎 PC 杭を破砕、洗浄、ふるい分けして採取したものであり、粒度分布は普通砕石と同様である。

表 4.1 使用材料の物性表

使用材料	記号	材料特性
普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³ 、比表面積:3400cm ² /g
普通砕砂	S	表乾密度:2.57g/cm ³ 、吸水率:1.77%、実積率:60.5%、F.M.:2.63
高炉スラグ細骨材（福山産）	BFS5	表乾密度:2.73g/cm ³ 、吸水率:0.30%、実積率:62.3%、F.M.:2.60
高炉スラグ細骨材（倉敷産）	BFS1.2	表乾密度:2.73g/cm ³ 、吸水率:0.40%、実積率:58.7%、F.M.:2.13
普通砕石	G	表乾密度:2.57g/cm ³ 、吸水率:1.62%、実積率:55.9%、F.M.:6.60
再生粗骨材	R G	表乾密度:2.43g/cm ³ 、吸水率:6.20%、実積率:54.8%、F.M.:6.58
高性能AE減水剤	Ad1	ポリカルボン酸エーテル系
AE剤	Ad2	高アルキルカルボン酸系

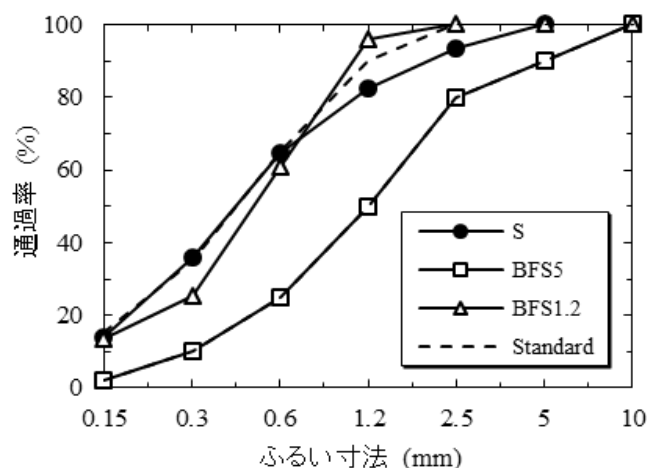


図 4.1 細骨材の粒度分布図

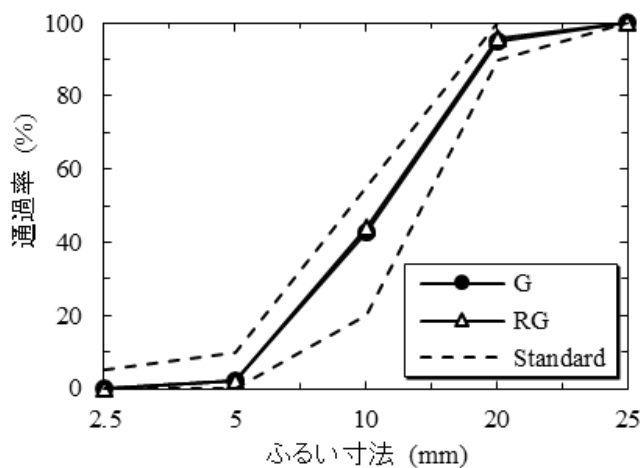


図 4.2 粗骨材の粒度分布図

4.2.2 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合を表 4.2 に示す。いずれの配合も第 3 章と同様に、単位セメント量と単位水量、および s/a を一定とした。配合名について、N は骨材として普通砕石・砕砂のみを用いた配合である。R は粗骨材に RG を用い、細骨材には普通砕砂を用いた。BFS を用いたコンクリートの配合名は「BFS の種類－容積混和率」とし、粗骨材として RG を用いたものには末尾に R を示した。コンクリートは、強制二軸練りミキサにより材料を 3 分間程度練り混ぜて作製した。BFS5 を 100%混和した場合は、目視で確認できるほど材料分離が著しかった。また、BFS5-100R では混和剤の添加量を調整しても、所定のスランプが得られなかったため、試験対象から除外した。

表 4.2 コンクリート配合表

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 (C×mas s.%)		Sl. (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
			W	C	S	BFS5	BFS1.2	G	RG	Ad1	Ad2			
N	47	47	165	350	802	-	-	905	-	1.2	0.005	13.0	4.9	21.1
BFS5-50					401	426						13.0	5.0	20.3
BFS5-100					-	852						11.0	5.0	20.2
BFS1.2-30					562	-	256					11.0	6.0	20
BFS1.2-50					401	-	426					13.0	7.0	18.7
R					802	-	-	-	855			11.5	5.0	20.2
BFS5-50R					401	426						11.0	7.0	20.8
BFS5-100R					-	852						2.5	5.0	19
BFS1.2-30R					562	-	256					13.0	6.0	22
BFS1.2-50R					401	-	426					13.0	5.5	21.1

4.2.3 試験方法

(1) スランプおよび空気量試験

スランプ試験は JIS A 1101、空気量試験を JIS A 1128 に従って行った。空気量試験に関しては、骨材修正係数を JIS A 1128 に準じて行った。なお、再生粗骨材を用いた場合は、細骨材の BFS の混和率に関係なく、骨材修正係数が 1.0% であった。したがって、再生粗骨材を用いた場合の空気量は、骨材修正係数 1.0% を減じた空気量とした。

(2) ブリーディング試験

JIS A 1123-2012 に従って行った。

(3) 圧縮強度試験

練上がり後のコンクリートを用いて作製した試験体に対しては、圧縮強度試験を JIS A 1108 に従って行った。また、試験体は 7 日間、28 日間の水中養生（水温 20±2℃）を行った。

(4) 液体窒素を用いた急速凍結融解試験



図 4.3 急速凍結融解試験

既往の研究⁴⁾を参考に、図 4.3 に示す試験装置を用いて行った。液体窒素を用いた急速凍結融解試験（以下、「急速凍結融解試験」と称す）は、液体窒素を試験体に吹き付けて凍結し、温水にて融解させることで、急速に凍結融解させるため短期間での凍結融解抵抗性の検討が可能である。また、JIS A 1148 で得られる試験結果と急速凍結融解試験結果との整合については、参考文献⁵⁾にて既に報告しているため詳細は割愛するが、急速凍結融解試験を 10 サイクル行った後の耐久性指数は、JIS A 1148 に準拠して 300 サイクルおこなった後の耐久性指数よりも低い傾向にある。以下に、試験手順を示す。

保冷容器中央に静置させた円柱試験体（φ100mm）に保冷容器に蓋をした状態で液体窒素を 30 秒間吹付けた後、45～50℃の温水に 5 分間浸せきさせた。温水から試験体を取り出しウェスで表面を拭いた後、試験体底部からの高さが 5mm の箇所にセンサを対面に設置して透過法で超音波伝播時間（μsec.）を測定した。この時、センサ間の距離も測定し、超音波伝播速度（km/sec.）を算出した。この工程を 1 サイクルとし、式[4-1]より算出した相対動弾性係数（%）が 60%以下となるか、10 サイクルに達するまで行った。また、耐久性指数を式[4-2]により算出した。

相対動弾性係数

$$= \frac{(VL_n)^2}{(VL_0)^2} \times 100 \quad \text{【4-1】}$$

ここに、

VL₀：試験前の超音波伝速度（km/sec.）

VL_n：n サイクル目の超音波伝播速度（km/sec.）

耐久性指数

$$= \frac{P \times N}{10} \times 100 \quad \text{【4-2】}$$

ここに、

P：N サイクルの時の相対動弾性係数（%）

N：相対動弾性係数が 60%以下になったときのサイクル数。10 サイクルまで相対動弾性係数が 60%を下回らないときは 10 とする。

なお、急速凍結融解試験に供した円柱試験体は、第 3 章での間隙通過性試験終了後にフレッシュコンクリートを採取して作製したもの（以下、ボックス試験体と称する）と、練混ぜ後終了後に練り返した後のフレッシュコンクリートを用いて作製したもの（以下、標準試験体と称する）の 2 水準とした。試験体は水中（20±2℃）で材齢は 28 日まで養生し、また、液体窒素を吹き付ける直前まで水中に浸せきさせた。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 圧縮強度試験結果

図 4.4 に各配合における標準試験体の材齢 7 日および 28 日の圧縮強度を示す。N と R

の圧縮強度を比較すると、Rの方が材齢7日では約5 N/mm²、材齢28日では約10 N/mm²低下した。普通粗骨材とRGおよびBFSを併用した配合との圧縮強度を比較した場合、RGとBFSを併用した配合は、材齢7日では5～10 N/mm²、材齢28日では15～20 N/mm²の低下が見られた。

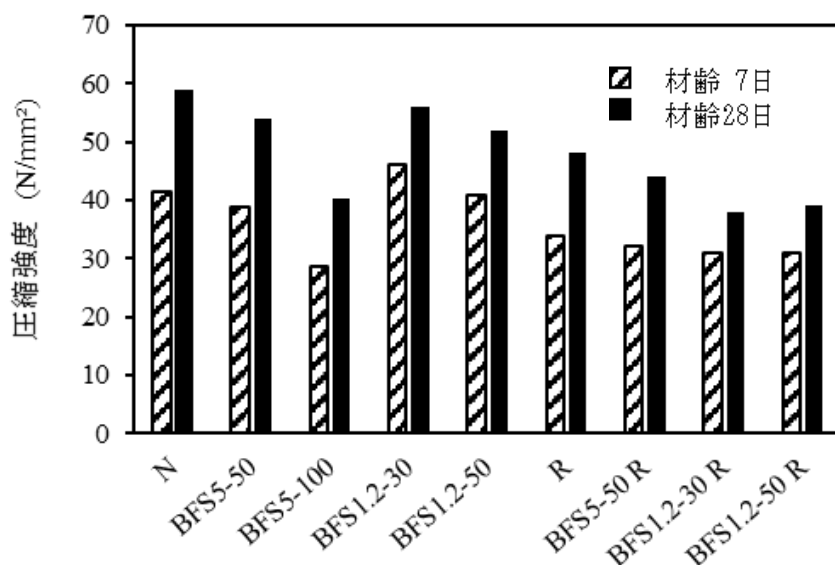


図 4.4 圧縮強度試験の結果図

RとRGおよびBFSを併用した試験体の圧縮強度を比較した場合、材齢7日ではほぼ同等であったが、RGおよびBFSを併用した試験体の方が材齢28日では5～10 N/mm²の低下が見られた。BFSを混和した場合は粗骨材によらず、材齢28日における圧縮強度が低くなった。この要因について、BFSの形状、BFS自体の強度、BFSとセメントペーストの付着の観点から考える。

石らは⁶⁾、BFSの混和により、材齢28日までの圧縮強度は低下し、その要因としてBFSの形状の角ばりから、遷移帯が多く生じた可能性を示唆している。ただし、これは川砂利・川砂との比較であり、本研究で用いた碎石・砕砂、RGはいずれも角ばっている。したがって、本研究とは強度低下の支配的要因は異なると思われる。本研究と同じ材料を用いた平田らの成果では、BFSを混和しても圧縮強度は無混和と同等以上であり、BFS自体の強度が要因とは考え難い。平田らと本研究の大きな違いは単位セメント量であり、単位セメント量が多いことでセメントペーストの付着力が強くなり、セメントペーストとBFSの付着性が十分に保たれたと考えられる。一方で、本研究では単位セメント量が350 kg/m³で普通強度域のコンクリート程度であり、表面がガラス質なBFSとセメントペーストの付着が弱いことが影響した可能性が考えられる。

しかし、BFSを混和している配合に関しては、潜在水硬性により材齢28日以降の圧縮強度の増加を示す既往の研究報告⁷⁾⁸⁾があり、本試験体も材齢28日以降では圧縮強度が増加する可能性がある。また、BFS5-100の圧縮強度が特に低いのは、ブリーディング量が著しく大きいことで、水みちが空隙を形成したことによる緻密性の低下や骨材界面の付着性の低下が要因と考えられる。

4.3.2 凍結融解抵抗性の試験結果

各配合における標準試験体の急速凍結融解試験結果を図 4.5 に示す。また、標準試験体の耐久性指数と第 3 章で実施した間隙通過性試験における A 室と B 室の加振ボックス試験から採取した試験体の耐久性指数の平均値（A1 と A2 の平均、B1 と B2 の平均）を図 4.6 に示す。BFS 混和による凍結融解抵抗性への影響としては、ブリーディング量およびエントラップトエアの増大によって凍結融解抵抗性が低下するとの知見⁸⁾⁹⁾と、BFS の混和によって向上するとの報告¹⁰⁾もある。これらから、BFS を混和してもブリーディング量とエントラップトエアが少ない範囲では、凍結融解抵抗性が向上する可能性があると考えられる。本実験のブリーディング量に関しては BFS5-100 を除き、終局ブリーディング量は $0.02 \sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ と小さい。またエントラップトエアは BFS の混和率と共に増えると考えられる。

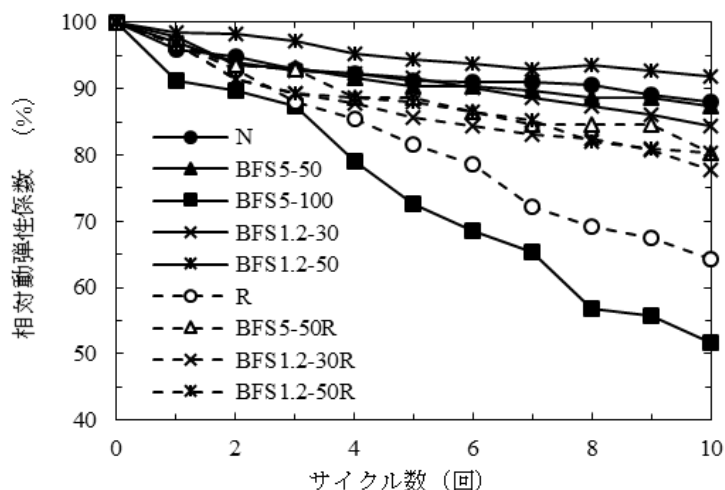


図 4.5 凍結融解抵抗性試験結果

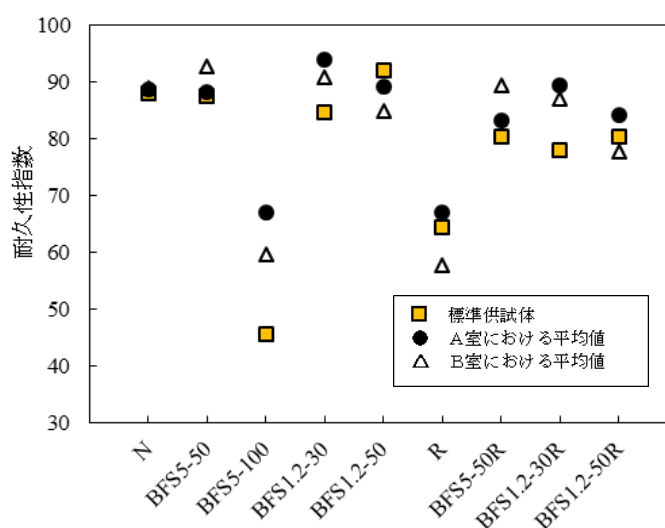


図 4.6 間隙通過試験後の凍結融解抵抗性試験結果

図 4.5 では N に BFS を混和した配合は、BFS5-100 を除くと、相対動弾性係数の低下は緩やかであり、耐久性指数は 85～90 程度であった。BFS5-100 では、ブリーディング量が大きいため、エントレインドエアが減少したことと、BFS5 の全量使用によりエントラップトエアが多く混入し気泡間隔係数が大きくなり、著しく低下したと考えられる¹¹⁾。また、BFS5-100 の加振ボックス試験後の耐久性指数は、A 室、B 室共に標準供試体よりも大きくなった。これは長く加振したことで、エントラップトエアが顕著に減少したためと推察しているが、気泡間隔係数等の測定により明確にする必要がある。

また図 4.5 では、RG を用いた配合において、3 サイクル目から相対動弾性係数の低下が大きく、耐久性指数は 64 となった。RG と BFS を併用した配合では、BFS の種類によらず耐久性指数は RG のみの場合よりも向上した。この結果は、平田らの成果と同じ傾向であり³⁾、また BFS1.2 を用いた場合でも同様の傾向が確認できた。要因としては、吸水率が小さい BFS の混和によりコンクリート中の含水量が小さかったことや、骨材周辺の水酸化カルシウムの析出量を抑制したことが考えられる¹⁰⁾。

一方で、前述の通り圧縮強度は BFS の混和により低下した。低温下と常温下で骨材界面

の特性を一律に比較できないが、BFSが水酸化カルシウムを消費するならば材齢 28 日以前の強度にも影響する可能性もあるため、強度と凍結融解抵抗性との関係は検討が必要であると考えている。

4.3.3 間隙通過性試験の後の凍結融解抵抗性の検討

第 3 章で実施した間隙通過性試験における A 室下側 A2 と B 室上側 B1 の棒状内部振動機の加振時間と耐久性指数の関係を図 4.7 と図 4.8 に示す。A2 の相関は決定係数 $R^2=0.80$ 程度となり相関性があると言えるが、B1 の決定係数 $R^2=0.52$ 程度であり、相関性があるとは言いがたい。これは、A2 が棒状内部振動機の先端が位置する箇所では振動が一番大きく、振動エネルギーが最も伝搬されるために材料分離が発生し、加振時間と耐久性指数に相関性が表れやすくなったと考えられる。

図 4.9 に A 室の耐久性指数の平均値 (A1 と A2 の平均) と B 室の耐久性指数の平均値 (B1 と B2 の平均) の関係を示す。なお、図中の実線は傾き =1、破線は ± 5 の乖離幅を示す。間隙通過前後における耐久性指数の変動は、概ね ± 5 程度の乖離幅となったが、R や BFS5-100 では 8~10 と他の配合よりも乖離幅が大きかった。これより、間隙通過性が良好であれば、局所的には加振や鉄筋間の通過の影響を受けるが、全体で見ると鉄筋通過前後での凍結融解抵抗性の変動は大きくなく、間隙通過性が劣るものでは間隙通過前後での変動が大きくなること が示された。従って、RG と BFS を用いる場合には間隙通過性が良好とな

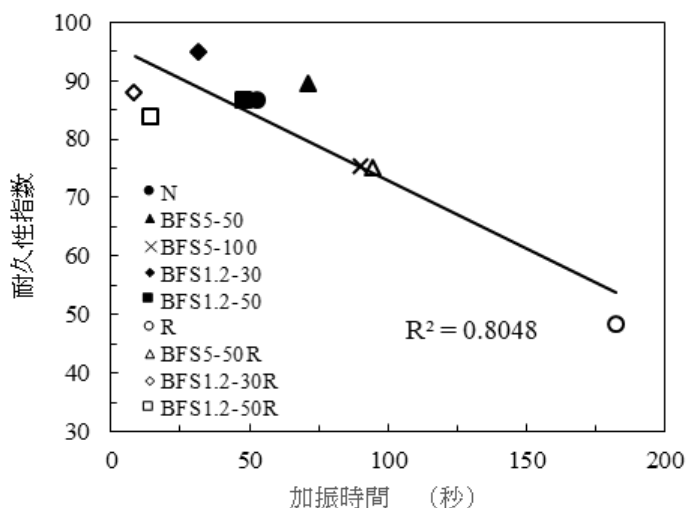


図 4.7 A2 の耐久性指数と加振時間の相関図

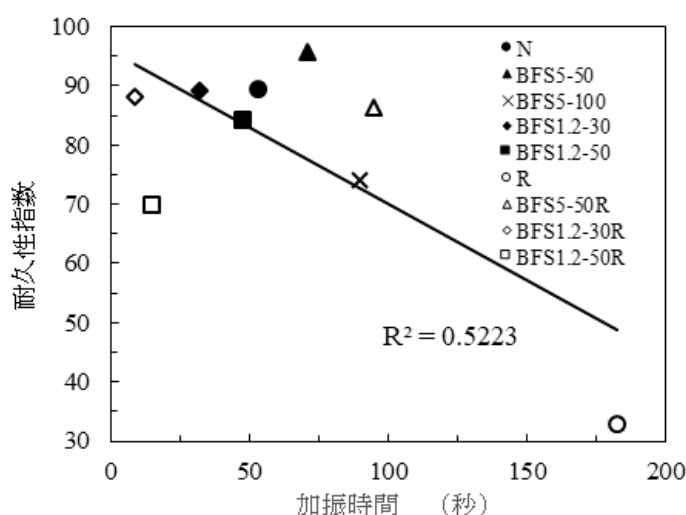


図 4.8 B1 の耐久性指数と加振時間の相関図

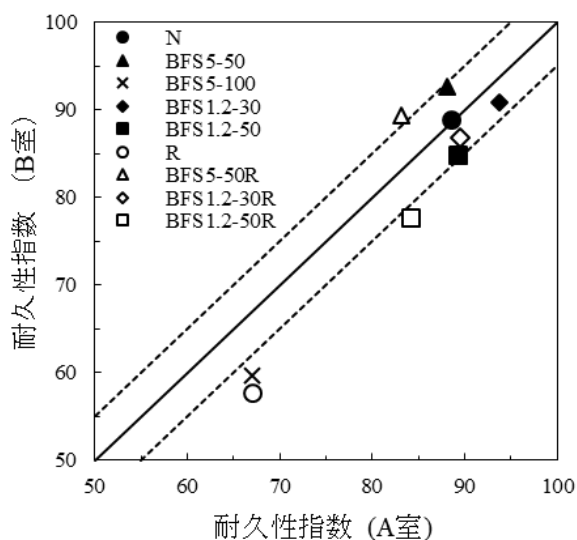


図 4.9 A 室と B 室の耐久性指数の相関図

るよう配合設計することが重要である。

4.4 第4章のまとめ

本章では、普通コンクリートの強度域における配合条件（W/C=47%）で、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5 および BFS1.2）を混和したコンクリートの耐久性について、以下に本章のまとめを示す。

- (1) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5、もしくは BFS1.2）を併用した場合の圧縮強度は、普通骨材のみのコンクリートと比較して材齢 7 日では $5\sim 10\text{N/mm}^2$ 、材齢 28 日では $15\sim 20\text{N/mm}^2$ 低下した。
- (2) 圧縮強度が低下した理由としては、単位セメント量が 350kg/m^3 で普通コンクリート程度であり、表面がガラス質な BFS とセメントペーストの付着が弱いことが影響した。
- (3) BFS5 を 100%置換した BFS5-100 の圧縮強度が、他の配合と比べて低い値を示したことはブリーディング量に関係し、ブリーディング量が著しく大きいことで水みちが空隙を形成したことによる緻密性の低下や骨材界面の付着性の低下である。
- (4) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を用いた場合の凍結融解抵抗性は、低度処理再生骨材のみのものより高く、十分な凍結融解抵抗性を有していた。
- (5) BFS5-100 の耐凍結融解抵抗性が他の配合よりも低いのは、ブリーディングにより形成された水みちによりコンクリートの緻密性が失われ、コンクリート内に水が浸入しやすくなり、その水が凍結した際の膨張により、コンクリートが影響をうけた。
- (6) RG と BFS を併用した配合では、BFS の種類によらず耐久性指数は RG のみの場合よりも向上した要因として、吸水率が小さい BFS の混和によりコンクリート中の含水量が小さかったことや、BFS が骨材周辺の水酸化カルシウムの析出量を抑制したといえる。
- (7) 間隙通過性試験において加振時間と耐久性指数の相関関係では、A2 で相関性があつたが、B1 では相関性がとれなかった。これは、A2 が棒状内部振動機の先端が位置する箇所では振動が一番大きく、振動エネルギーが最も伝搬されるために材料分離が発生し、加振時間と耐久性指数に相関性が表れやすくなった為である。
- (8) フレッシュコンクリートの間隙通過性が良好であれば、局所的には加振や鉄筋間の通過の影響を受けるが、全体で見ると鉄筋通過前後での凍結融解抵抗性の変動は大きくなく、間隙通過性が劣るものでは間隙通過前後での凍結融解抵抗性の変動が大きくな

る。よって、RG と BFS を用いる場合には間隙通過性が良好となるよう配合設計することが重要である。

参考文献

- 1) 片平 博、渡辺博志、山田 宏：粗骨材の耐凍害性評価指標の検討、コンクリート工学年次論文集 Vol.36、No. 1、pp.1072-1077、2014
- 2) 菊池雅史、道正泰弘、安永 亮、江原恭二、益田 彰：再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集 第 474 号、pp.11-20、1995
- 3) 平田大希、橋本親典、横井克則、渡邊 健：多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.38、No. 1、pp.1785-1790 (2016)
- 4) 湯北記代彦、橋本 紳一郎、加地 貴、橋本 親典：液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No. 1、pp.887-892、2006
- 5) 弓場上有沙、橋本 親典、渡邊 健、石丸 啓輔：再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較、コンクリート工学年次論文集、 Vol.33、No. 1、pp.941-946、2011
- 6) 石 東昇、梶田佳寛、李 榮蘭：高炉スラグ細骨材の性状とコンクリート圧縮強度への影響に関する実験、建築学会構造系論文集、第 76 巻、第 667 号、pp.1541-1546、2011
- 7) 丸安隆和ほか：高炉セメントコンクリートの研究、コンクリート・ライブラリー、第 25 号、pp.2-5、1970
- 8) 小玉克己：高炉スラグのコンクリートへの利用に関する研究、土木学会論文報告集、第 298 号、pp.109-122、1980
- 9) 堤 嵩示、吉野 公、黒田 保、吉澤千秋：高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、 Vol.38、 No. 1、pp.69-74、2016
- 10) 綾野克紀、藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.70、No.4、pp.417-427、2014
- 11) 山崎舞、千歩 修、長谷川拓哉：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.65、No.1、pp.406-412、2011

第 5 章 高炉セメントを使用し高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの施工性能と凍結融解抵抗性の検討

5.1 概説

5.1.1 はじめに

第 1 章でも述べたように、環境保全の観点から今後は再生資源の活用が高まると予測される。特に川砂や一部の日本近海の海砂の採取が禁止されている現状から、砂利や骨材については、再生骨材の利用が増加していくと考えられる。最近になって、再生骨材には日本工業規格も定まり、地域ごとに品質が変わらない管理された再生骨材が市販されることが可能となった。しかしながら、再生骨材は、供用中の構造物の現状まで把握して産廃プラントが回収することが難しく、さらには、複数の構造物が解体された骨材が混ざり合っ

て製造されるため、再生骨材の状況を派生する骨材ごとに把握することが難しい。特に、アルカリ骨材反応や骨材周辺のモルタルに塩分を含んでいた場合には、再生骨材として利用する場合に構造物への耐久性に関する影響が懸念される。

コンクリート用再生骨材は日本工業規格により H、M、L に分類され、その記載に引用規格として骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法：JIS A 1145、モルタルバー法：JIS A 1146）、フレッシュコンクリート中の塩化物イオン濃度試験方法（JIS A 1144）の記載がある。再生骨材 M を用いたコンクリート（JIS A 5022）、再生骨材 L を用いたコンクリート（JIS A 5023）では、骨材のアル



写真 5.1 アルカリ骨材反応の橋脚¹⁾

カリシリカ反応性による区分に関しては生産者と協議になっており、「生産者は、購入者の要求があれば、配合設計、再生骨材コンクリートに含まれる塩化物含有量の計算、及びアルカリシリカ反応抑制対策の方法の基礎となる資料を提出しなければならない」との記載がある。塩化物含有量については、どちらも 0.30kg/m^3 以下とされている。

近年、アルカリ骨材反応による構造物の被害は、全国に渡り数多く報告^{1) 2) 3)}されており、構造物の耐久性を著しく低下させる要因の一つである。アルカリ骨材反応が発見された構造物は、その進行度合いで適切な補修・補強を実施するか、もしくは解体して新設する選択がなされる。アルカリ骨材反応の構造物を取り壊す場合においては、その骨材を再生骨材コンクリートとして再利用することは無いと考えるが、アルカリ骨材反応を発生しないまま供用が終了し、解体されて再生骨材として再利用される場合は、再生骨材コンクリートととして利用後にアルカリ骨材反応が発生する可能性については否定できない。そのため再生骨材は、原骨材のアルカリシリカ反応性やその履歴は不明で、不特定多数の構造物の骨材が混在することから、再生骨材は JIS A 5308 の区分 B の骨材、アルカリシリカ反応性が「無害でない」として、混合セメントの使用による対策を基本としている。また、既往の研究でも再生骨材のアルカリ骨材反応における対策等の報告が少ないことは否めない。

そこで本章では、アルカリ骨材反応を抑制する手段として一般的に普及している高炉セメント B 種と高炉スラグ細骨材を混和した水セメント比 47%の普通強度域の再生骨材コンクリートを提案し、その施工性能と凍結融解抵抗性について検討した。

5.2 実験概要

5.2.1 使用材料

使用材料の物性を表 5.1、骨材の粒度分布を図 5.1 および図 5.2 に示す。第 3 章、第 4 章と同様に高炉スラグ細骨材（以下、「BFS」と称す）は福山産の BFS5 と倉敷産の BFS1.2 の 2 種類を用いた。粒度分布は図 5.1 および図 5.2 に示すように、BFS1.2 は BFS5 よりも粒度が細かい。低度処理再生粗骨材（以後、「RG」と称す）は、基礎 PC 杭を破砕、洗浄、ふるい分けして採取したものであり、粒度分布は普通砕石と同様である。

表 5.1 使用材料の物性表

使用材料	記号	種類	物性等
セメント	C	高炉セメント B種	密度:3.04g/cm ³ 、比表面積:3810cm ² /g
細骨材	S	普通砕砂	密度:2.55g/cm ³ 、吸水率:2.43%、F.M.2.85、実積率:64.1%
	BFS5	高炉スラグ細骨材（福山産）	密度:2.78g/cm ³ 、吸水率:0.89%、F.M.2.9、実積率:54.8%
	BFS1.2	高炉スラグ細骨材（倉敷産）	密度:2.73g/cm ³ 、吸水率:0.85%、F.M.2.4、実積率:60.1%
粗骨材	G	普通砕石	密度:2.57g/cm ³ 、吸水率:1.62%、F.M.6.66、実積率:55.9%
	RG	再生粗骨材	密度:2.48g/cm ³ 、吸水率:4.40%、F.M.6.53、実積率:56.6%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
	AEA	AE剤	高アルキルカルボン酸系

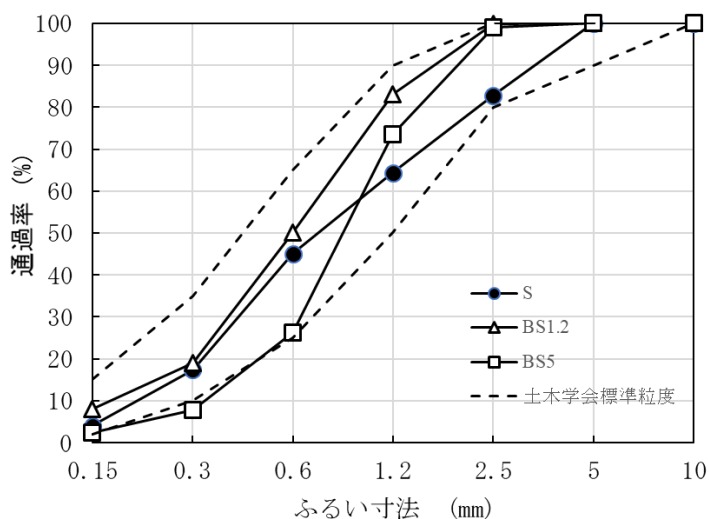


図 5.1 細骨材の粒度分布図

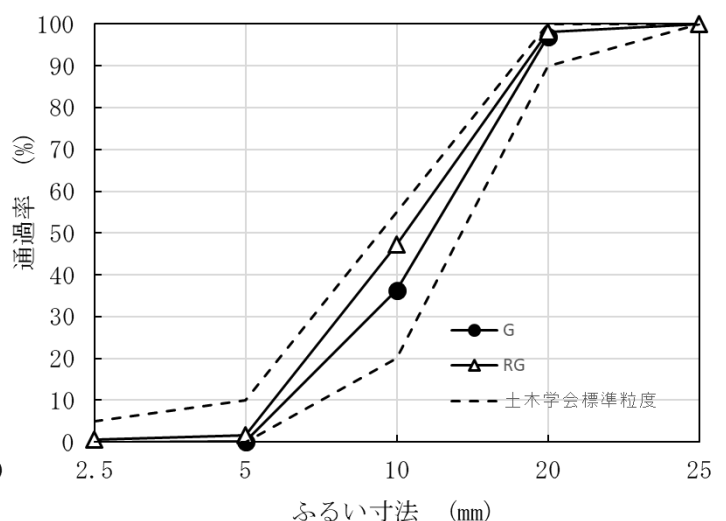


図 5.2 粗骨材の粒度分布図

5.2.2 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合を表 5.2 に示す。いずれの配合も、単位セメント量、単位水量、s/a を一定とした。配合名について、N は骨材として普通砕石・砕砂のみを用いた普通骨材の配合とした。R は粗骨材に RG を用い、細骨材には普通砕砂を用いた。BFS を用いたコンクリートの配合名は「BFS の種類－容積混和率」とし、粗骨材として RG を用いたものには末尾に R を示した。コンクリートは、ブリーディング試験用、耐久性試験用、その他の試験用として強制二軸練りミキサを用い、所定の材料を 3 分間程度練り混ぜて作製した。

表 5.2 コンクリート配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤 (C × mass.%)		SL. (cm)			Air (%)		
			W	C	S		G				施工性能		耐久性	施工性能		耐久性
					S	BFS	G	RG	SP	AEA	その他の試験	ブリーディング試験		その他の試験	ブリーディング試験	
N	47	47	165	350	791	-	899	-	1.05	0.007	12.0	13.0	13.0	4.9	6.4	6.4
BFS5-30					554	257	899	-	0.85		11.5	9.0	12.0	6.4	6.5	6.3
BFS5-50					396	428	899	-	0.80		12.0	13.0	12.0	5.9	5.6	6.6
BFS1.2-30					554	254	899	-	0.65		11.0	13.0	13.0	7.0	6.2	5.7
BFS1.2-50					396	424	899	-	0.50		12.0	11.0	13.0	6.3	6.2	6.1
R					791	-	-	868	1.15		11.0	11.0	11.0	6.2	6.0	5.2
BFS5-30R					554	257	-	868	1.00		13.0	10.0	11.0	7.0	7.0	6.6
BFS5-50R					396	428	-	868	0.75		11.0	12.0	13.0	7.2	6.9	6.7
BFS1.2-30R					554	254	-	868	1.05		11.5	12.5	11.5	5.6	5.3	6.1
BFS1.2-50R					396	424	-	868	0.80		12.5	13.0	12.0	7.0	5.7	6.6

5.2.3 試験方法

(1) スランプおよび空気量試験

スランプ試験は JIS A 1101、空気量試験を JIS A 1128 に従って行った。空気量試験に関しては、骨材修正係数の算定を JIS A 1128 に準じておこなった。骨材修正係数を表 5.3 に示す。したがって、空気量に関しては、骨材修正係数を減じた空気量とした。

(2) ブリーディング試験

JIS A 1123-2012 に準拠して実施した。

(3) 圧縮強度試験

練上がり後のコンクリートを用いて作製した試験体に対しては、圧縮強度試験を JIS A 1108 に準拠して実施した。また、試験体は 7 日間、28 日間、91 日間の水中養生（水温 20±2℃）を行った。また、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験」に準拠し、静弾性係数の測定を実施した。

静弾性係数については、一軸載荷試験機にて荷重載荷した供試体の応力－ひずみ曲線において、最大荷重の 1/3 に相当する応力と供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力を結ぶ傾きで表され、以下の式【5-1】を用いて算出した。

表 5.3 骨材修正係数表

配合名	骨材修正係数 (%)
N	0.60
BFS5-30	0.25
BFS5-50	0.40
BFS1.2-30	0.40
BFS1.2-50	0.50
R	0.80
BFS5-30R	0.45
BFS5-50R	0.50
BFS1.2-30R	0.45
BFS1.2-50R	0.30

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad 【5-1】$$

ここに、

E_c ：静弾性係数（kN/mm²）

S_1 ：最大荷重の 1/3 相当する応力（N/mm²）

S_2 ：ひずみ 50×10^{-6} のときの応力（N/mm²）

ε_1 ：応力 S_1 によって生じるひずみ

（4）液体窒素を用いた急速凍結融解試験

第 4 章と同様に、液体窒素を用いた急速凍結融解試験（以下、「急速凍結融解試験」と称す）を実施した。急速凍結融解試験は、液体窒素を試験体に吹き付けて凍結し、温水にて融解させることで、急速に凍結融解させるため短期間で凍結融解抵抗性の検討が可能である。また、急速凍結融解試験の一連の工程を 1 サイクルとし、式【5-2】より算出した相対動弾性係数（%）が 60%以下となるか、10 サイクルに達するまで行った。また、耐久性指数を式【5-3】により算出した。

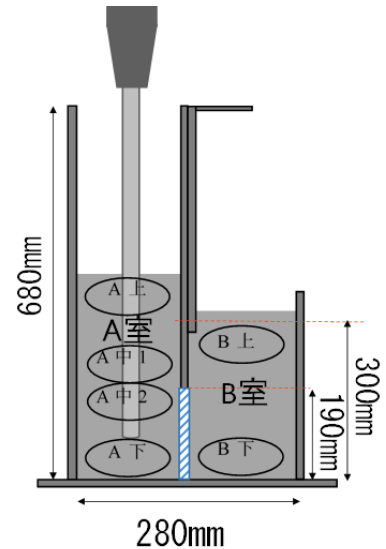


図 5.3 採取資料の位置

相対動弾性係数

$$= \frac{(VL_n)^2}{(VL_0)^2} \times 100 \quad 【5-2】$$

ここに、

VL_0 ：試験前の超音波伝速度（km/sec.）

VL_n ：n サイクル目の超音波伝播速度（km/sec.）

耐久性指数

$$= \frac{P \times N}{10} \times 100 \quad 【5-3】$$

ここに、

P ：N サイクルの時の相対動弾性係数（%）

N ：相対動弾性係数が 60%以下になったときのサイクル数。10 サイクルまで相対動弾性係数が 60%を下回らないときは 10 とする。

なお、急速凍結融解試験に供した円柱試験体は、練混ぜ終了後に練り返した後のフレッシュコンクリートを用いて作製したもの（以下、標準試験体と称する）と間隙通過性試験終了後にフレッシュコンクリートを採取して作製したもの（以下、ボックス試験体と称する）とし、さらに、練混ぜ終了後に練り返した後のフレッシュコンクリートを用いて作製したものは、JIS A 1148（A 法）に準拠した試験法でも実施した。間隙通過性試験終了後

の試験体は、図 5.3 に示す位置から採取した。採取個数は、A 室から A 上、A 中 1、A 中 2、A 下の 4 個、B 室から B 上、B 下の 2 個とした。試験体は水中（20±2℃）で材齢は 28 日まで養生し、また、液体窒素を吹き付ける直前まで水中に浸せきさせた。

(5) タンピング試験

スランプ試験の終了後の試料に対して木製棒(質量 1.2kg)を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下(以下、タンピングと称する)させた。タンピングを 8 回終了するごとにスランプ (JIS A 1101) およびスランプフロー (JIS A 1150) を測定するとともに、スランプコーンの状況を目視確認した。タンピングによる測定回数は、8、16、24、32 回とした。試験項目は、単位スランプフロー変化量 Ksf (mm/回) を式【5-4】により求めた。

$$Ksf = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i S_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n S_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad 【5-4】$$

ここに、

Ksf：単位スランプフロー変化量(mm/回)

n：測定した回数

x_i ：i 回目の測定時におけるタンピング回数 (回)

S_i ：i 回目の測定時におけるスランプフロー (mm)

(6) 加振ボックス充填試験

第 3 章と同様に加振ボックス充填試験による間隙通過性評価は、JSCE F 701-2016「ボックス容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験 (案)」に従って試験を行った (以下、「間隙通過性試験」と称す)。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) ブリーディング性状

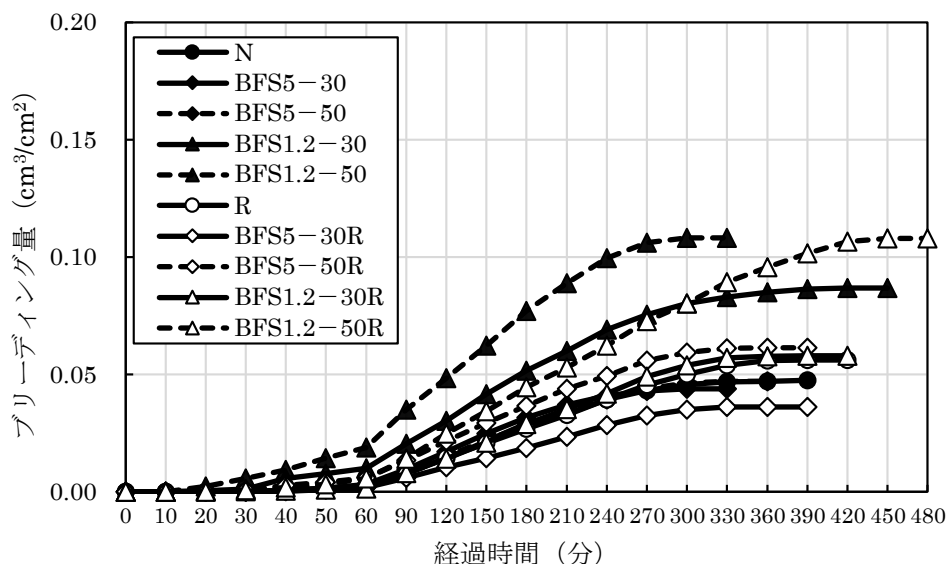


図 5.4 経過時間－ブリーディング量

図 5.4 にブリーディング量と時間の関係、図 5.5 に終局ブリーディング量を示す。高炉スラグ細骨材の混和率を増加させるとブリーディングが増加する傾向を示すが、今回の BFS を混和させた試験を実施した配合では、粗骨材に普通骨材 N を使用した場合と RG を使用した場合で、終局ブリーディング量が鉄筋コンクリート構造物に適用できる範囲（日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」の品質

規定、ブリーディング量 $\leq 0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ）であった。BFS1.2-50 は、実験開始から 60 分後以降にブリーディング量の増加が見られたが、終局ブリーディング量は約 $0.11\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。

RG を用いた配合では、BFS の種類や混和率によらず、ブリーディング量は BFS1.2-50R で $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であったが、それ以外では $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 未満であった。これは、再生骨材表面の凹凸や、骨材表面に付着している微粒分によってブリーディング水が保水されたと考えられる⁴⁾。従って、再生粗骨材の場合において、BFS1.2 もしくは BFS5 を混和してもブリーディング量に影響しないことが示された。

(2) タンピング試験

図 5.6 は、タンピング試験におけるスランプ変化量を示す。タンピング回数が増加するに従い、スランプが増加した。普通骨材 N を用いた配合では、タンピング回数が 32 回時に BFS5-30 と BFS5-50 はスランプが 20.0cm を上回った。スランプの増加量は、BFS5-30 が 9.0cm、BFS5-50 が 8.0cm であった。また、BFS1.2-30 は、初期が 11.0cm、タンピング回数が 32 回の時でも 13.5cm とスランプの増加量が 2.5cm と

少なかった。BFS1.2 を混和した場合には粗粒率が 2.4 と普通砕砂よりも小さく、単位当たりの表面積が増えてモルタルを拘束することになり、スランプの増加が少なかったと考える。また、BFS5 では実績率が普通砕砂よりも小さいが、密度は $2.78\text{g}/\text{cm}^3$ と大きいためにタンピングによる振動と BFS5 の自重によりスランプが大きくなったと考える⁵⁾。

RG を用いた配合では、BFS5-30R に関してタンピング回数が 32 回の際に 19.0cm で初

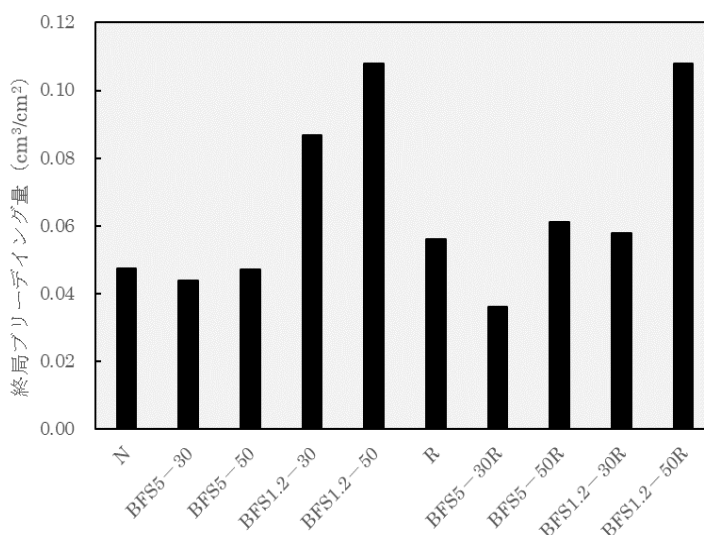


図 5.5 終局ブリーディング量

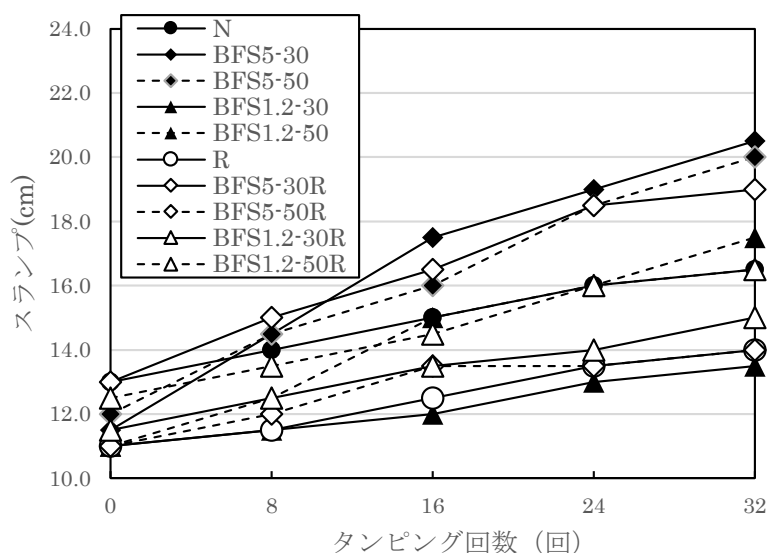


図 5.6 タンピングによるスランプの変化量

期値からの増加量が 6.0cm となったが、それ以外では、タンピング回数が 32 回時にスランプは 17.0cm を下回る結果であった。よって、RG の場合では、BFS1.2 も BFS5 もタンピングによるスランプの増加は少なく、再生粗骨材の表面が角張っていることや表面の付着物の凹凸により抵抗が増え骨材の移動が少なかったことが影響していると考ええる。

タンピング試験によるスランプの変化量の差異は、混和材として使用した高炉スラグ細骨材の種類や混和量、密度や実績率、再生粗骨材の状況がスランプに影響したと考える。

図 5.7 は、タンピング試験におけるスランプフロー変形量を示す。スランプと同様にタッピング回数が増加することで、スランプフローが増加していた。普通骨材 N を用いた配合では、BFS5-30 と BFS5-50 はタンピング回数が 32 回時のスランプフローの増加量が、それぞれ 135.5mm と 167.7mm を示した。BFS5-50 は、タンピングの際に上円が崩壊しながら広がった。タッピングによるスランプの変化量が最も少なかった BFS1.2-30 のタンピング回数が 32 回時のスランプフローは、261.5mm で増加量も 30.0mm に留まった。

RG を用いた配合では、R に関してタンピング回数が 32 回の時に 246.0mm で増加量が 26.5mm と最も少なかった。スランプフローが最も大きかった BFS5-30R は、タンピング回数が 32 回の時に 361.3mm となり、増加量は 82.0mm であった。本研究では、32 回のタンピング試験後でも著しい材料分離が発生していなかったことを観察した。

図 5.8 に単位スランプフロー変化量を示す。単位スランプフロー変化量は、混和材として使用した BFS5 と BFS1.2 で違いが見られた。BFS5-30 と BFS5-50 の単位スランプフロー変化量は、前者が 4.1mm/回、後者が 5.3mm/回で普通骨材 N の 2 倍以上の結果であった。また、BFS の混和率が 30% よりも 50% の方が、単位スランプフロー変化量が高い傾向を示した。しかし、BFS1.2-30 は、単位スランプフロー変化量が 1.01mm/回と普通

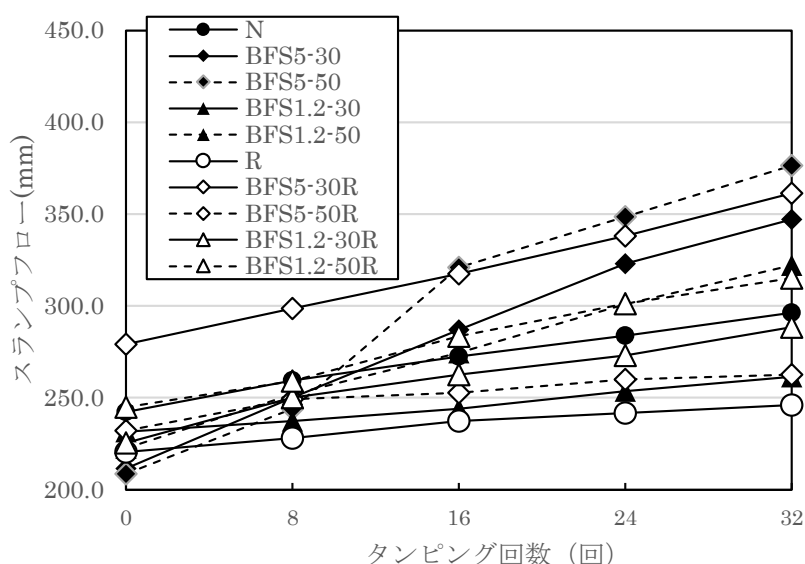


図 5.7 タンピングによるスランプフローの変化量

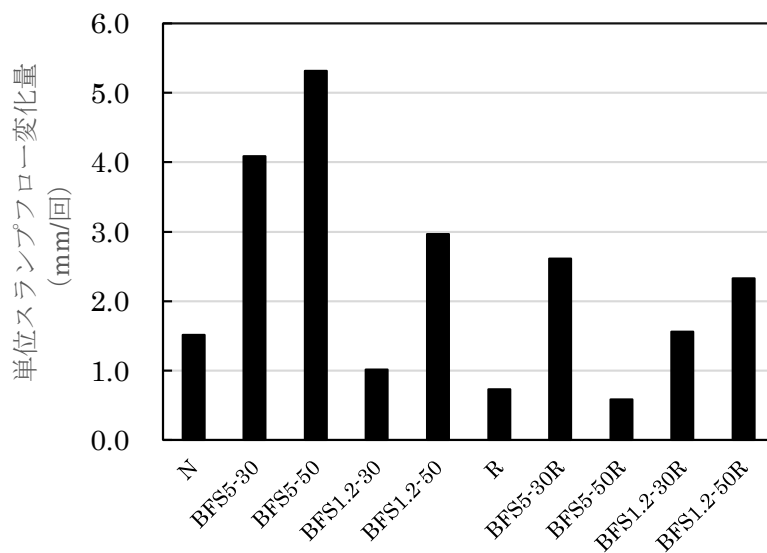


図 5.8 単位スランプフロー変化量

骨材 N の単位スランプフロー変化量の 1.5mm/回を下回る結果となった。

RG を用いた配合では、R の単位スランプフロー変化量が 0.73mm/回と普通骨材 N と比べて 1/2 程度低い値を示した。さらに、BFS5-50R は、単位スランプフロー変化量が 0.58mm/回となり R よりも低い値を示した。また、BFS5-30R と BFS5-50R についての単位スランプフロー変化量は、BFS5-50R の方が BFS5-30R を下回る結果となった。よって、タンピングによる単位スランプフロー変化量の差異に関しては、スランプと同様に混和材として使用した高炉スラグ細骨材の種類や混和量、密度や実積率、再生粗骨材の状況が影響したと考える。

(3) 間隙通過性について

図 5.9 は高炉セメント B 種、図 5.10 は第 4 章におけるポルトランドセメントを使用した際の間隙通過性試験における充填高さ 190mm と 300mm に到達するまでに要した加振時間のグラフである。また、図 5.11 には、高炉セメント B 種とポルトランドセメントを使用した際の間隙通過速度

(V_{pass}) の比較図を示す。

図 5.9 と図 5.10 から、高炉セメント B 種を使用した場合とポルトランドセメントを使用した場合では、間隙通過時間に大きな差異が見られた。特に再生粗骨材を使用した RG では、高炉セメント B 種を使用した場合で間隙通過時間がポルトランドセメントを使用した場合の 4 倍以上短くなった。また、BFS1.2 を混和させ高炉セメント B 種を使用した場合では、普通骨材 N や RG の使用に関わらず間隙通過時間が約 20 秒となった。さらに BFS1.2 を混和した場合は、ポルトランドセメントで再生粗骨材を使用した場合においても間隙通過時間が短かった。これは、BFS1.2 が BFS5 よりも粒度が細かいために粗骨材間に入ることで粗骨材間の衝突や鉄筋と粗骨材との衝突を緩和し、さらに高炉セメント B 種を使用していることで BFS1.2 よりも細かな高炉スラグ微粉

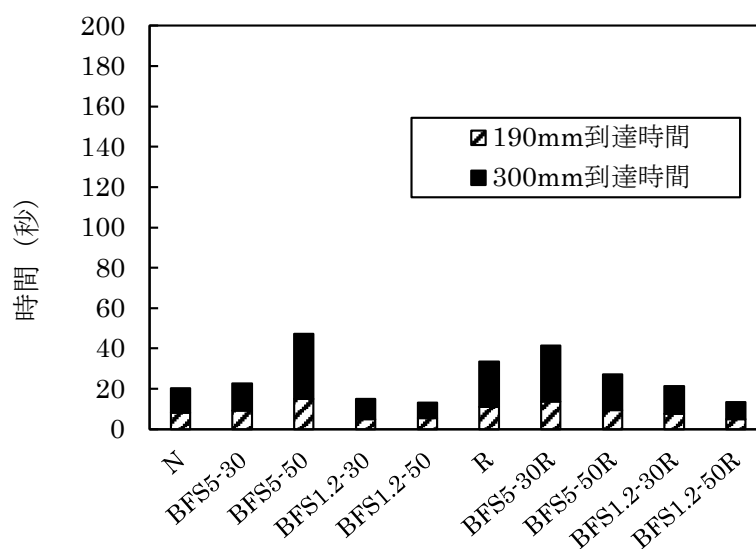


図 5.9 190mm と 300mm の到達時間
(高炉セメント B 種)

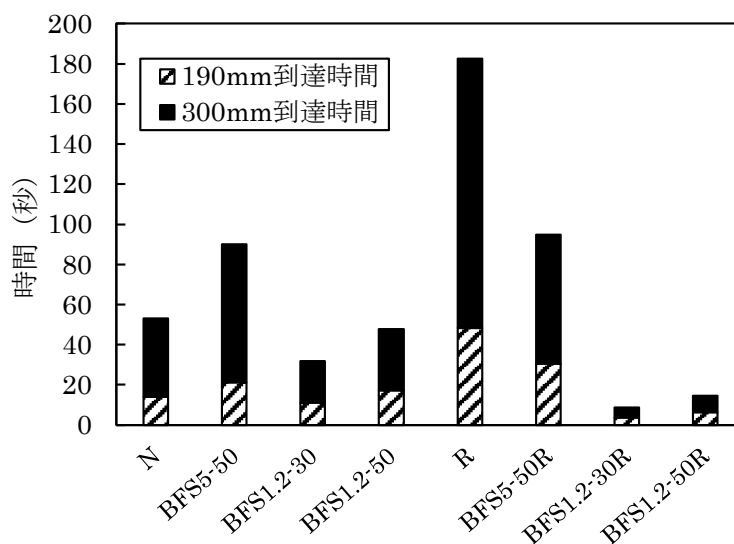


図 5.10 190mm と 300mm の到達時間
(ポルトランドセメント)

末が影響して棒状内部振動機の振動をコンクリート中に伝搬できたことが要因であると考え⁶⁾。

一方、高炉セメント B 種を使用して RG を使用した場合には、BFS5-30R の間隙通過時間が約 40 秒を必要としたが、間隙通過試験後のコンクリートには材料分離などの状況は観察されなかった。また、高炉セメント B 種を使用した場合において、RG に BFS を混和した場合は普通骨材 N に BFS を混和した場合よりも BFS5-50 を除き間隙通過に少しだけ時間を要し

た。これは、RG の表面に付着したセメントペーストの粘性や粗骨材表面の凹凸が骨材同士の接触や鉄筋と接触した際に、滑りを阻害して流動性が低下したことが要因と考える⁷⁾。しかしながら、高炉セメント B 種を使用した場合は、ポルトランドセメントを使用した場合よりも間隙通過に要する時間が短縮し、材料分離も見られない結果を得た。

図 5.11 から、第 3 章では、ポルトランドセメントを使用して BFS を混和させたフレッシュコンクリートの間隙通過性の検討をおこなった際の V_{pass} の平均値は 6.4mm/秒、本章における高炉セメント B 種を使用した場合の V_{pass} の平均値は約 8.4mm/秒であった。高炉セメント B 種を使用した方が、 V_{pass} の値が高かった。これは、高炉セメント B 種を使用したことにより、高炉セメント中に含まれている高炉スラグ微粉末により粗骨材同士の接触の際の摩擦を軽減したことや骨材間のモルタル中に高炉スラグ微粉末が入り込むことで、バイブレータの振動を伝えやすくなったことが流動性を向上させた要因と考える。

写真 5.2 には、間隙通過試験後の BFS5-30R と BFS5-50R の A 室と B 室の上面から撮影した写真を示す。間隙通過試験後の A 室では、表面にセメントペーストが浮き出て来ており、大きな気泡も幾つも確認出来たが、骨材などは確認出来なかった。また、B 室では、表面にセメントペース等は顕著でなかったが、大きな気泡は A 室と同様に数多く確認された。

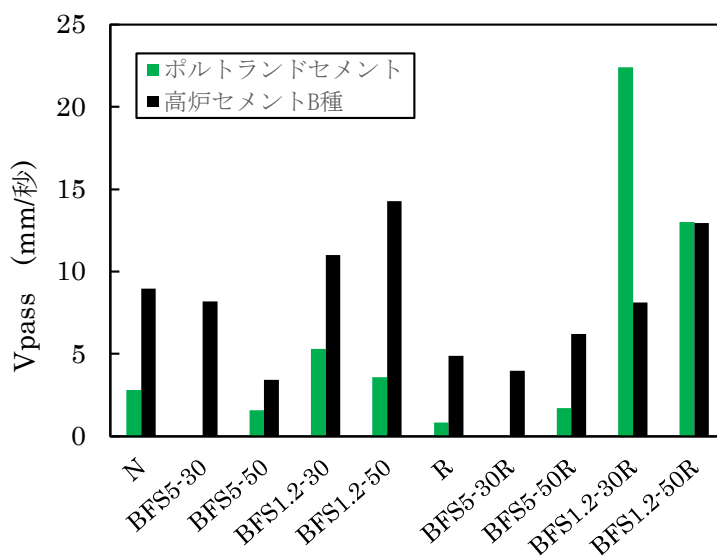


図 5.11 間隙通過速度の比較図

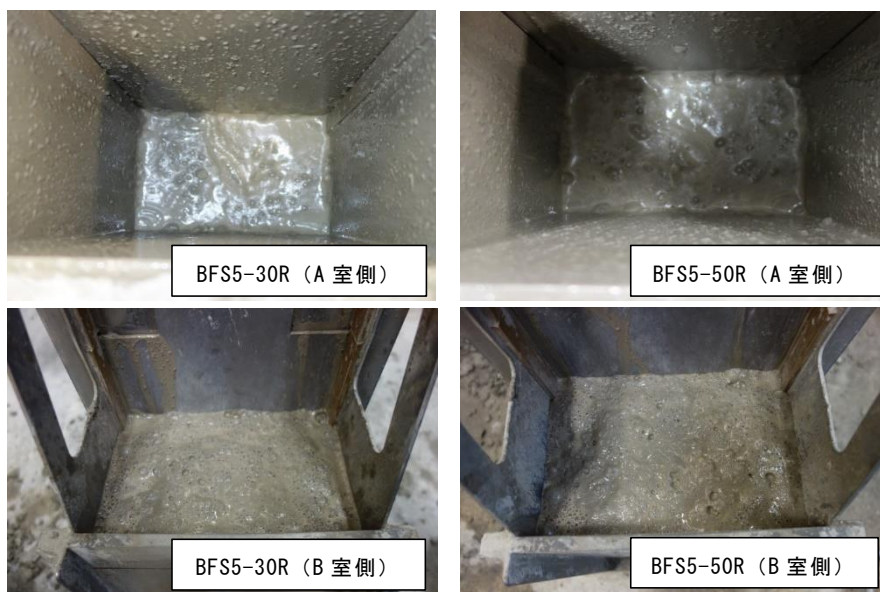


写真 5.2 間隙通過試験後のコンクリートの表面写真

5.3.2 硬化後のコンクリートの性状と施工性能

(1) 圧縮強度および静弾性係数

図 5.12 には、高炉セメント B 種を使用した各配合における標準試験体の材齢 7 日、28 日、91 日の圧縮強度を示す。材齢 7 日の圧縮強度は、普通骨材 N と RG の骨材の違いで大きな差異が発生しなかった。しかし、BFS5-30、BFS5-50、BFS5-50R では、普通骨材 N の圧縮強度を上回った結果を得た。粗骨材を RG として BFS を 30%、50%と混和率を変えても材齢 7 日の初期の圧縮強度に大きく影響することは無いことがわかった。材齢 28 日に関しては、普通骨材 N を使用した場合において BFS1.2 を 50%混和した BFS1.2-50 について普通骨材 N の圧縮強度を下回ったが、BFS5-50 については普通骨材 N の圧縮強度を上回る増加傾向を示した。RG を使用した場合には、BFS5-30R、BFS5-50R で普通骨材 N の圧縮強度と同等以上の結果を得た。材齢 91 日に関しては、全ての配合で増加傾向を示し、特に BFS5 は BFS5-30 を除く全ての配合で普通骨材 N の圧縮強度と同等か、それ以上の結果を得た。

図 5.13 には、第 4 章で述べたポルトランドセメントを使用した材齢 28 日の圧縮強度試験の結果と本章の結果を比較した図を示す。普通骨材 N を使用した場合では、ポルトランドセメントの材齢 28 日における圧縮強度が高炉セメント B 種を使用した場合よりも高い値を示した。しかし、RG の場合は、BFS を混和した場合に材齢 28 日の圧縮強度が同等となった。圧縮強度試験の結果からは、BFS5 と BFS1.2 の使用によ

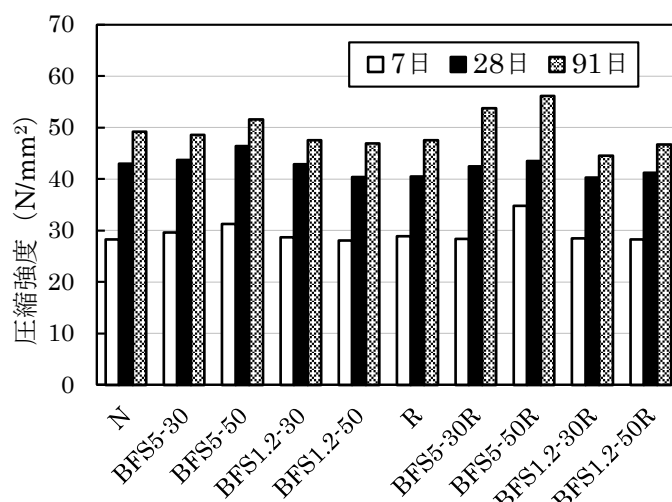


図 5.12 圧縮強度試験 (高炉セメント B 種)

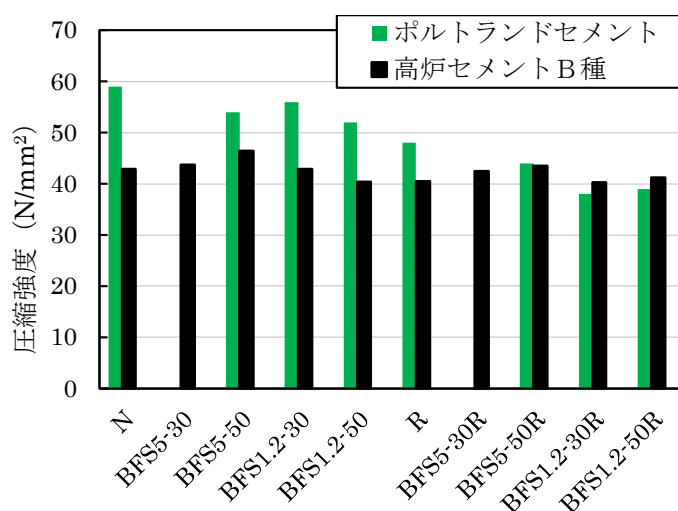


図 5.13 圧縮強度試験の比較 (材齢 28 日)

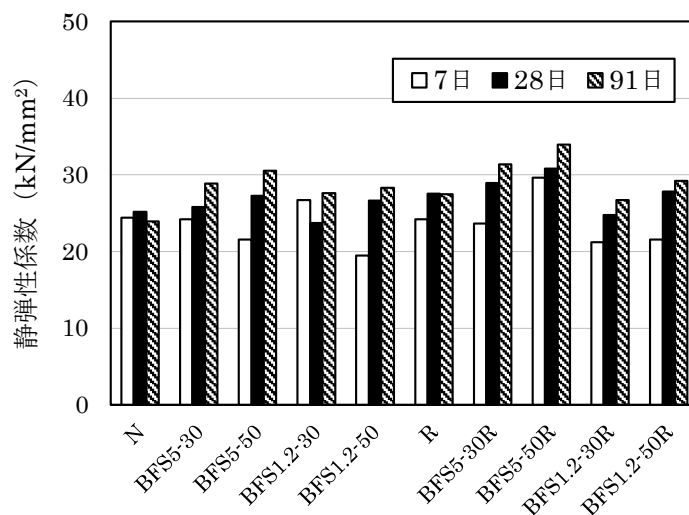


図 5.14 静弾性係数

る材齢ごとの圧縮強度や増加量に差異が現れたが、この差は著しいもので無い結果を得た。また、RG と BFS5 もしくは BFS1.2 を混和した配合では、普通骨材 N の圧縮強度を上回る配合もあり、高炉セメント B 種と BFS を併用したことでセメントペーストおよび RG 表面に付着する旧モルタル界面の $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ との潜在水硬性が影響^{8) 9)}していると考える。

図 5.14 に各配合における標準試験体の材齢 7 日、28 日、91 日の静弾性係数を示す。BFS を混和した場合の静弾性係数は、材齢ごとの圧縮強度の増加に伴い普通骨材 N と BFS1.2-30 を除き、増加傾向を示した。また、BFS を混和させた場合は、材齢 28 日以降で普通骨材 N を上回る結果を得た。さらに、BFS の混和率の違いで影響が見られ、混和率が増加すると静弾性係数も増加する傾向を示した。これは、潜在水硬性による圧縮強度の増加と高炉スラグ細骨材がガラス質で応力による変形が少ないことが静弾性係数に影響¹⁰⁾したと考える。

(2) 凍結融解抵抗性と間隙通過試験の検討

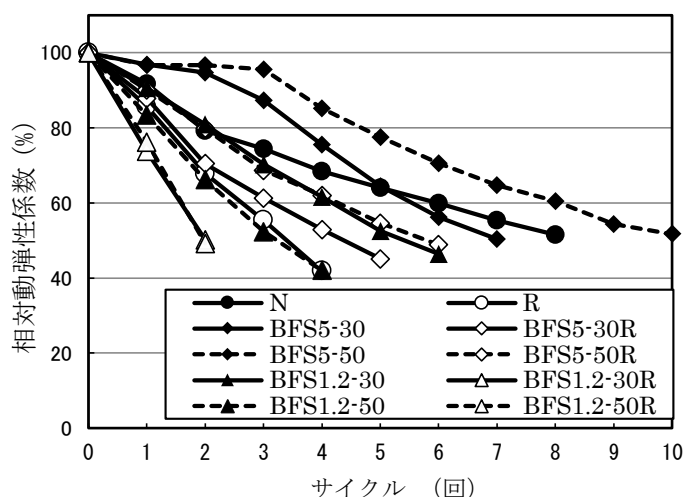


図 5.15 急速凍結融解試験結果

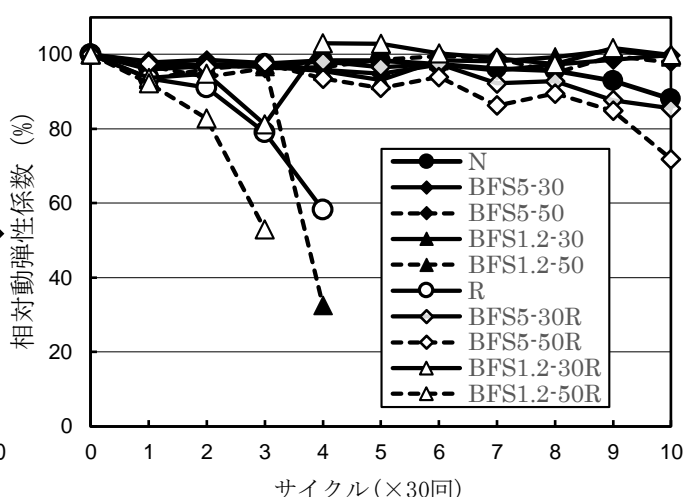


図 5.16 JIS A 1148 (A 法)における凍結融解抵抗性試験結果

図 5.15 には急速凍結融解試験の結果、図 5.16 には JIS A 1148 (A 法)における凍結融解抵抗性試験の結果を示す。図 5.15 より、急速凍結融解試験の結果は、全ての配合で相対動弾性係数が 60% を下回った。しかし、JIS A 1148 (A 法)での凍結融解抵抗性試験の結果は、R と BFS1.2-50、BFS1.2-50R に関して相対動弾性係数が 60% を下回った。また、急速凍結融解試験を実施した供試

体から表 5.4 に示した 4 配合について気泡間隔係数と平均気泡径を測定したが、どちらの数値も著しくかけ離れた結果ではなかった。これは、高炉セメント B 種は高炉スラグ微粉末が混和されており、セメント量がポルトランドセメントよりも少ないため、材齢 28 日では骨材や高炉スラグ細骨材近傍でのセメントの水和反応が進行途中であり、部分的に急速凍結融解試験の様な過酷な試験条件に耐えるだけの付着力や強度を有していなかったことが要因であると考ええる。そこで、高炉セメント B 種を用いた配合における練り混ぜ後のコ

表 5.4 気泡間隔係数と平均気泡径

配合名	気泡間隔係数 (μm)	平均気泡径 (μm)
N	221.1	82.7
BFS5-30	320.6	119.2
R	193.8	73.1
BFS5-30R	159.5	74.6

ンクリートの凍結融解抵抗性試験の結果は JIS A 1148 (A 法) での結果を用いて考察し、さらに図 5.17 では、ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を用いた場合の配合における耐久性指数について比較検討した。

図 5.16 から、相対動弾性係数が 60%を下回った R と BFS1.2-50 と BFS1.2-50R の配合は、前記した圧縮強度も材齢 28 日でポルトランドセメントと同程度を示し、ブリーディング量も著しく高い値を示すことがなかった。本研究では、BFS を混和することにより凍結融解抵抗性が向上すると予測したが、普通骨材 N もしくは RG を使用し BFS1.2 を 50%混和した場合に効果を確認できなかった。これは、高炉セメント B 種と BFS1.2 を 50%混和したことによりブリーディング量が小さく、潜在水硬性が進み圧縮強度の向上等が得られた一方で、普通砕砂 S よりも低い粗粒率のため、モルタルの粘性が高まり、エントラップトエアを多く含んでしまったことが要因でないかと推察する。よって、高炉セメント B 種を使用して BFS1.2 を混和する場合には、混和量の綿密な検討を要すると考える。

図 5.17 には、ポルトランドセメントと高炉セメント B 種のそれぞれで作成した供試体の凍結融解抵抗性試験結果における耐久性指数の比較を示す。BFS1.2 を 50%混和した配合以外は、ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を使用した場合でも耐久性指数に違いは見られなかった。

図 5.18 は高炉セメント B 種を使

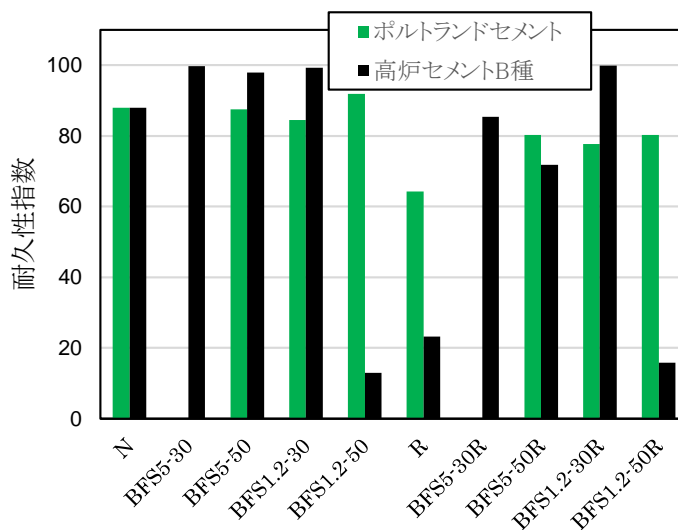


図 5.17 耐久性指数の比較

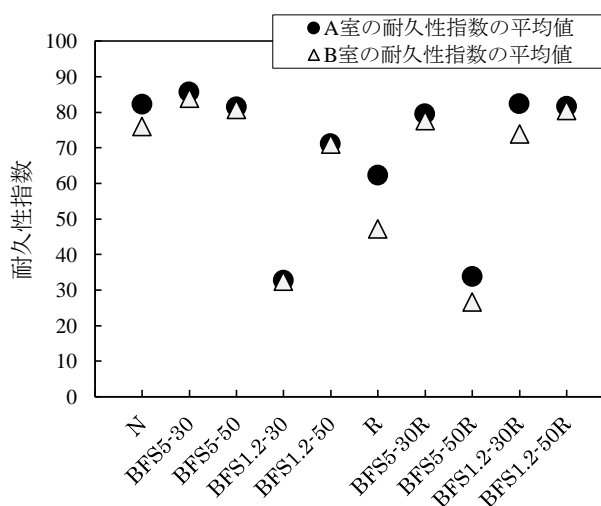


図 5.18 各配合における A 室と B 室の耐久性指数(高炉セメント B 種)

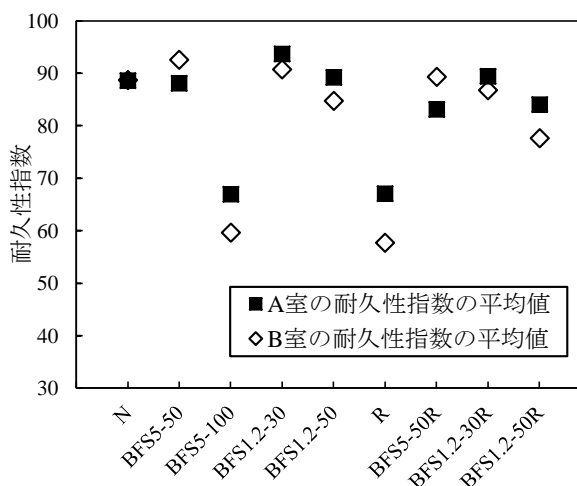


図 5.19 各配合における A 室と B 室の耐久性指数(ポルトランドセメント)

用し、図 5.19 にポルトランドセメントを使用した間隙通過性試験後における A 室と B 室のボックス試験体の耐久性指数の平均値を示す。図 5.18 から R と BFS1.2-30、BFS5-50R は、A 室と B 室の両方で耐久性指数が 60 を下回る結果となった。また、各配合とも A 室と B 室の耐久性指数が同等、もしくは A 室の耐久性指数が高い結果を得た。一方、図 5.19 から、ポルトランドセメントを使用した場合でも、棒状内部振動機の加振時間の違いがあるものの、BFS5-50 と BFS5-50R を除き高炉セメント B 種を使用した場合と同様に A 室の耐久性指数が 60 よりも大きい結果を得た。高炉セメント B 種を使用した場合に全ての配合で A 室の耐久性指数が大きい理由としては、棒状内部振動機での加振時間が配合中で最も長かった BFS5-50 でも約 47 秒、平均すると約 25 秒とポルトランドセメントを使用した場合と比較して短く、A 室と B 室共に材料分離も発生していなかったことから、高炉セメント B 種を使用したことによる高炉スラグ微粉末によりフレッシュコンクリートの流動性が向上して粗骨材が鉄筋近傍で閉塞することが無く、さらに棒状内部振動機で直接加振された A 室は、B 室よりもエントラップトエアが減少したためと推察している。しかしながら、R は高炉セメント B 種を使用して間隙通過性が向上し、材料分離なども発生していなかったが、凍結融解抵抗性に関しては耐久性指数が 60 を下回る結果となった。

図 5.20 には、高炉セメント B 種を使用した際の A 室の耐久性指数の平均値（A1、A 中 1、A 中 2、A2 の平均）と B 室の耐久性指数の平均値（B 上と B 下の平均）の関係を示す。なお、図中の実線は傾き=1、破線は ± 5 の乖離幅を示す。間隙通過試験後における A 室と B 室の耐久性指数の関係は、RG と BFS1.2-30R を除き概ね ± 5 程度の乖離幅となった。これより、間隙通過性が良好であれば、局所的には棒状内部振動機の加振や鉄筋間の通過の影響を受ける可能性は否めないが、全体で見ると BFS を混和した場合に鉄筋通過前後での凍結融解抵抗性の変動は小さくなく、間隙通過性が劣らず加振時間が長時間でなければ間隙通過前後での凍結融解抵抗性の変動が大きくなることが示された。従って、高炉セメント B 種を用いることで流動性と間隙通過性が向上し、耐凍害性に関しても間隙通過前と通

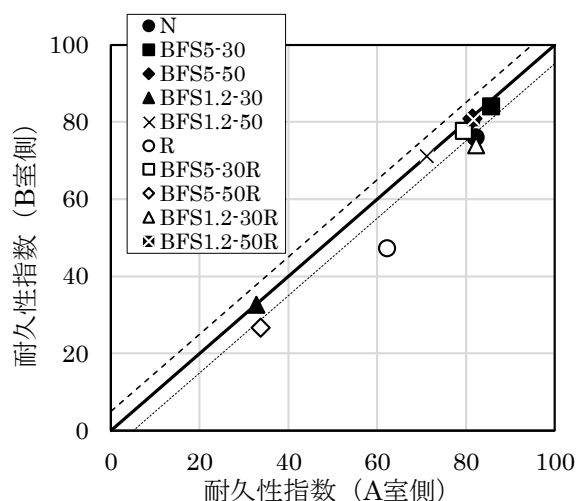


図 5.20 A 室と B 室の耐久性指数の比較

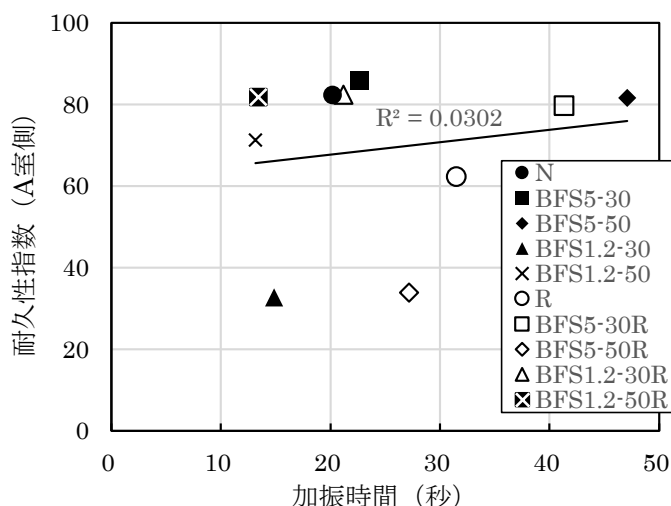


図 5.21 A 室の耐久性指数と加振時間の比較

過後での変動も少ないことがわかった。しかし、標準供試体での BFS1.2-30 と BFS5-50R は凍結融解抵抗性があることを示せたが、間隙通過試験後の凍結融解抵抗性試験では、耐久性指数が 60 を下回る結果を得た。このことから、高炉セメント B 種を使用して BFS を混和する場合は、棒状内部振動機の振動により凍結融解抵抗性に影響を与える可能性があるため、混和する BFS の種類や配合量については綿密な検討を要することが必要と推察する。

図 5.21 と図 5.22 には、高炉セメント B 種を使用した際の間隙通過性試験における前者が A 室と後者が B 室における耐久性指数の平均値と棒状内部振動機の加振時間の関係を示す。図 5.21 から A 室での相関は、決定係数 $R^2=0.0302$ となり相関があるとは言いがたい。また、図 5.22 から B 室の相関に関しても、決定係数が $R^2=0.2622$ となり相関があるとは言いがたい。ただし、BFS1.2-50 と BFS5-50R は加振時間が短かったが、耐久性指数は 60 を下回る結果となり、一方で、BFS5-50 と BFS5-30R は、加振時間が

40 秒以上と他の配合よりも長い時間であったが、耐久性指数は 60 以上であった。よって、高炉セメント B 種を使用し BFS を混和する場合は、粗骨材が N もしくは RG に関わらず間隙通過性が向上し、加振時間も第 3 章のポルトランドセメントと比較して短く、材料分離が発生しなかった結果を得たが、BFS の種類や混和量等により凍結融解抵抗性に影響する可能性があると言推察する。

図 5.23 には、棒状内部振動機直下の A 下における耐久性指数と棒状内部振動機の加振時間の関係を示す。A 下部分は、棒状内部振動機の振動エネルギーが最も伝わりやすく材料分離を起こしやすい部分と推察するが、A 下での耐久性指数と加振時間の相関は、決定係数が $R^2=0.0492$ となり相関があるとは言いがたい。本配合においては、加振時間だけが凍結融解抵抗性に影響していると言えない結果を得た。よって、高炉セメント B 種を使用し BFS を混和させたコンクリートの場合は、複合材料として複数の要因が発生することを予測して、耐久性や施工性能を低減させる要因を検証し配合設計を綿密に設計する必要があると推測する。本配合では、施工性能の評価と耐久性の評価の両方を満足したものとし

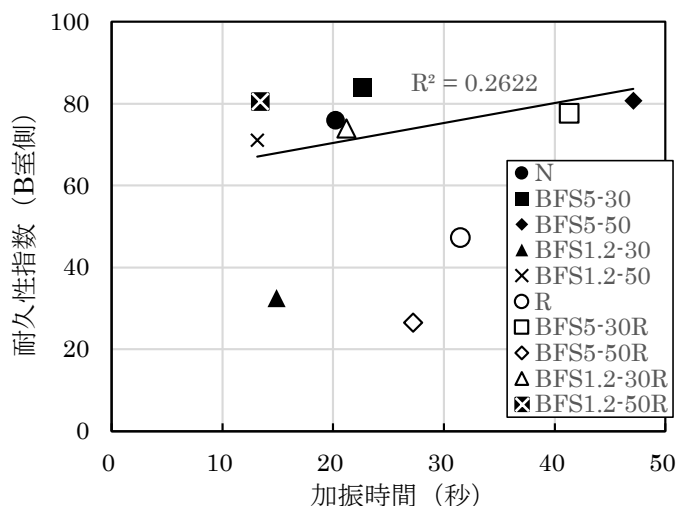


図 5.22 B 室の耐久性指数と加振時間の比較

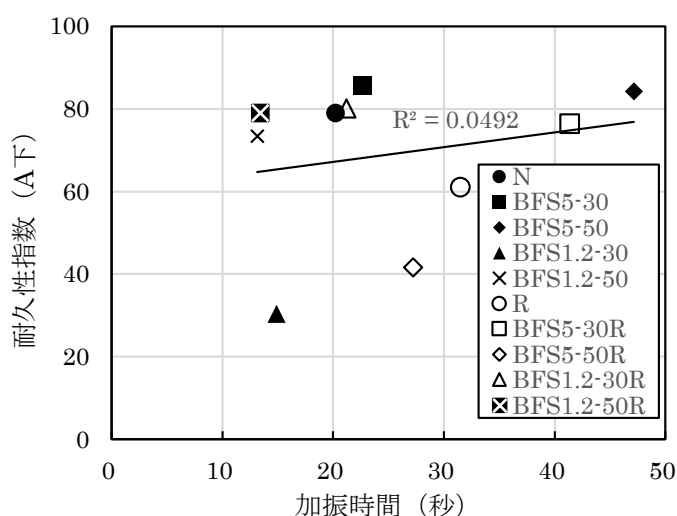


図 5.23 A 下の耐久性指数と加振時間の比較

て、N、BFS5-30、BFS5-50、BFS5-30R、BFS1.2-30R であった。

5.4 第5章のまとめ

本章では、普通コンクリートの強度域における配合条件（W/C=47%）で、高炉セメントを使用し低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5 および BFS1.2）を混和したコンクリートの施工性能と凍結融解抵抗性について、以下に本章のまとめを示す。

- (1) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5、もしくは BFS1.2）を使用した場合、タンピング試験では材料分離が発生せず、間隙通過試験においても平均の V_{pass} が 6.4mm/秒となり材料分離を起こして閉塞することはなかった。本実験の結果から、普通ポルトランドセメントと比較して、高炉セメント B 種に高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートは十分な施工性能を有していた。
- (2) 終局ブリーディング量は、鉄筋コンクリート構造物に適用できる範囲であり、圧縮強度も、第4章で実験したポルトランドセメントの圧縮強度の材齢7日より低いものの、材齢7日から91日まで潜在水硬性の効果から増加傾向を確認できた。また、高炉セメント B 種に高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートは、BFS5-30R、BFS1.2-30R で十分な凍結融解抵抗性を有していた。

参考文献

- 1) 国土交通省：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）、pp.4-9、2008.3
- 2) コンクリート構造物の耐久性シリーズ編：アルカリ骨材反応、技報堂出版株式会社、1990
- 3) 大代 武志、広野 真一、野村 昌弘、鳥居 和之：富山市周辺の橋梁の ASR 劣化と骨材の岩石学的特徴に関する調査、コンクリート工学年次論文集 Vol.35、No. 1、pp.991-996、2013
- 4) 辻本 和敬、山田 悠二、橋本 親典、近藤 拓也：高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの施工性能および急速凍結融解抵抗性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、Vol.71、1 号、pp.595-602、2017
- 5) 岡 友貴、山田 悠二、橋本 親典、渡邊 健：非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No. 1、pp.1033-1038、2015.2
- 6) 宮崎 優治、平尾 哲也、辻本 和敬、橋本 親典：高炉スラグ細骨材を用いた再生粗骨材コンクリートの施工性能に関する研究、土木学会第 73 回年次学術講演会、V-291、pp.581-582、2018.3
- 7) 土木学会編：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会報告書、コンクリート技術シリーズ 102、2013
- 8) 齊藤 和秀、木之下 光男、伊原 俊樹、吉澤 千秋：高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No. 1、pp.139-144、2009

- 9) 宮崎 優治、山野 裕喜、辻本 和敬、橋本 親典：高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する研究、土木学会四国支部、Jsce7-066-2018
- 10) 上本 洋、阿部 道彦、鹿毛 忠継、浅野 研一：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験、コンクリート工学年次論文集、 Vol.33、No. 1、pp.119-124、2011

第 6 章 結論

6.1 結論

近年、環境対策が重要視され海砂や川砂利の採取が困難な時代となったことにより、コンクリート構造物の解体後に発生する再生骨材を次に建設する構造物のコンクリートとして利用するリサイクル時代の到来を予測して、再生骨材コンクリートの施工性能や耐久性を十分に確保することの必要性が高まってきた。そこで、本研究では、信頼性の高い再生骨材コンクリートを構造物に広く使用できることを目指して、再生骨材と混和材料（高炉スラグ細骨材）を使用した各種配合条件のフレッシュコンクリートに対する施工性能と硬化後のコンクリートの耐久性の評価をおこなった。また、再生骨材を使用する際に懸念されるアルカリ骨材反応を抑制するために高炉セメント B 種を使用した再生骨材コンクリートの施工性能や凍結融解抵抗性について検討した。第 3 章から第 5 章の各章で得られた成果を以下にまとめる。

第 3 章 高炉スラグ細骨材を混和し低度処理再生粗骨材を全量使用した再生骨材コンクリートの施工性能に関する一考察

第 3 章では、普通コンクリートの強度域における配合条件（W/C=47%）で、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5 および BFS1.2）を混合したコンクリートの施工性能について、第 3 章の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) コンクリート練り混ぜ後のスランプ、空気量に関しては、低度処理再生粗骨材を使用した場合のコンクリートや高炉スラグ細骨材を置換したコンクリートでも所定の数値を得ることができた。練り混ぜ終了時のフレッシュコンクリートの状況は、普通粗骨材に高炉スラグ細骨材の BFS1.2、もしくは BFS5 を混合した配合、低度処理再生粗骨材に高炉スラグ細骨材の BFS1.2、もしくは BFS5 を混合した配合も材料分離が見られなかった。
- (2) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5 もしくは BFS1.2）を同時に混合したフレッシュコンクリートのブリーディング量は、高炉スラグ細骨材（BFS5 もしくは BFS1.2）が無混合の低度処理再生粗骨材と普通細骨材の配合のフレッシュコンクリートと同等であった。
- (3) 普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 100% 置換した配合のフレッシュコンクリートの終局ブリーディング量は、約 $0.9\text{cm}^3/\text{cm}^2$ をとなり日本建築学会の基準値を大きく上回る結果となったが、普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 50% 置換した配合のフレッシュコンクリートの終局ブリーディング量は $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となり、普通粗骨材に高炉スラグ細骨材 BFS5 を用いた場合では、高炉スラグ細骨材 BFS5 の 50% 置換までブリーディング量を抑える事ができることがわかった。
- (4) 間隙通過試験の結果から、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS1.2）を用い

たコンクリートは、間隙通過性が向上した。

- (5) 間隙通過試験の結果から、低度処理再生粗骨材と普通細骨材を使用したフレッシュコンクリートは300mmに達する時間が182秒と長く、特に190mmから300に達するまでの時間は134秒と他の配合よりも長時間の加振を必要とした。よって、低度処理再生粗骨材を使用する際は、鉄筋周辺で発生が予測される材料分離や長時間のバイブレーションの加振によるブリーディングに注意が必要である。
- (6) 間隙通過試験の結果から、粗骨材が低度処理再生粗骨材でも高炉スラグ細骨材BFS1.2を使用した場合には加振時間が短く、間隙通過速度 V_{pass} が高炉スラグ細骨材BFS1.2を30%置換で22mm/秒、高炉スラグ細骨材BFS1.2を50%置換で13秒と普通細骨材を100%使用したフレッシュコンクリートよりも早い数値を得た。
- (7) ブリーディング量と間隙通過速度 V_{pass} の関係では、相関があると言い難い状況であった。その為、終局ブリーディング量が高くとも間隙通過速度 V_{pass} に影響を与えることは少ないことがわかった。

第4章 普通コンクリートの強度域配合条件における高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性に関する一考察

第4章では、普通コンクリートの強度域における配合条件（W/C=47%）で、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5およびBFS1.2）を混合したコンクリートの耐久性について、第4章のまとめを以下に示す。

- (1) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5、もしくは BFS1.2）を併用した場合の圧縮強度は、普通骨材のみのコンクリートと比較して材齢 7 日では 5～10N/mm²、材齢 28 日では 15～20 N/mm² 低下した。
- (2) 圧縮強度が低下した理由としては、単位セメント量が 350kg/m³ で普通コンクリート程度であり、表面がガラス質な高炉スラグ細骨材とセメントペーストの付着が弱いことが影響した。
- (3) 普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 100%置換したコンクリートの圧縮強度が、普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS1.2 もしくは BFS5 を 50%まで置換したコンクリートの圧縮強度、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS1.2 もしくは BFS5 を 50%まで置換したコンクリートの圧縮強度と比べて低い値を示したことはブリーディング量に関係し、普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 100%置換したコンクリートのブリーディング量が著しく大きいことで、水みちが空隙を形成したことによる緻密性の低下や骨材界面の付着性の低下が起因している。
- (4) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を用いた場合の凍結融解抵抗性は、低度処理

再生骨材のみのものより高く、十分な凍結融解抵抗性を有していた。

- (5) 普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 100%置換したコンクリートの耐凍結融解抵抗性が他の配合よりも低いのは、ブリーディングにより形成された水みちによりコンクリートの緻密性が失われ、コンクリート内に水が浸入しやすくなり、その水が凍結した際の膨張により、コンクリートが影響をうけた。
- (6) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を併用した配合では、高炉スラグ細骨材の種類によらず耐久性指数は低度処理再生粗骨材のみの場合よりも向上した要因としては、吸水率が小さい高炉スラグ細骨材の混和によりコンクリート中の含水量が小さかったことや、高炉スラグ細骨材が骨材周辺の水酸化カルシウムの析出量を抑制したといえる。
- (7) 間隙通過性試験において加振時間と耐久性指数の相関関係では、加振側のフレッシュコンクリートで相関性があったが、間隙通過側のフレッシュコンクリートでは相関性がとれなかった。これは、加振側のフレッシュコンクリートが棒状内部振動機の先端が位置する箇所で振動が一番大きく、振動エネルギーが最も伝搬されるために材料分離が発生し、加振時間と耐久性指数に相関性が表れやすくなった為である。
- (8) フレッシュコンクリートの間隙通過性が良好であれば、局所的には加振や鉄筋間の通過の影響を受けるが、全体で見ると鉄筋通過前後での凍結融解抵抗性の変動は大きくなく、間隙通過性が劣るものでは間隙通過前後での凍結融解抵抗性の変動が大きくなる。よって、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を用いる場合には、間隙通過性が良好となるよう配合設計することが重要である。

第 5 章 高炉セメントを使用し高炉スラグ細骨材を混和した再生骨材コンクリートの施工性能と凍結融解抵抗性の検討

第 5 章では、普通コンクリートの強度域における配合条件（W/C=47%）で、高炉セメントを使用し低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5 および BFS1.2）を混合したコンクリートの施工性能について、第 5 章で得られた結果をまとめると以下の様になる。

- (1) 低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材（BFS5、もしくは BFS1.2）を使用した場合の終局ブリーディング量は、鉄筋コンクリート構造物に適用できる範囲（日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」の品質規定、ブリーディング量 $\leq 0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ）であった。また、低度処理再生粗骨材を用いた配合でも同様であった。
- (2) 単位スランプフロー変化量は、普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 50%置換したコンクリートが 5.3mm/回と各配合の中で大きな数値であった。しかしながら、全ての配合でのタンピング試験の結果からは、材料分離が発生しなかった。

(3) 間隙通過性試験は、300mm までの到達時間で普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 50%置換したコンクリートが約 46 秒かかったが、全ての配合で、材料分離が発生して閉塞することはなかった。

(4) 圧縮強度では、第 4 章で実験したポルトランドセメントの圧縮強度よりも材齢 7 日の値は低いものの、材齢 7 日から 91 日までで増加傾向を示した。これは、高炉スラグ細骨材を使用した事による潜在水硬性の効果である。

(5) 間隙通過試験性から採取した供試体の凍結融解抵抗性の結果からは、普通粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS1.2 を 30%置換したコンクリートと低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 50%置換したコンクリートを除き、耐久性指数が 60 以上を確認できた。また、各配合における耐久性指数のバラツキも 5%以内であった。

以上、第 3 章と第 4 章で得られた結果から、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を混合させたコンクリートは、普通強度域におけるコンクリートでも十分な施工性能と耐久性を持っていることが分かった。また、含水量の高い再生骨材を使用することで懸念される凍結融解抵抗性に関しても、高炉スラグ細骨材を混合させることで抑制されることがわかった。ただし、高炉スラグ細骨材 (BFS5) の置換率を 100%とした場合は、ブリーディング量が「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説」の品質規定、ブリーディング量 $\leq 0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を大きく上回る結果を得た。これにより、高炉スラグ細骨材の置換率には、十分な検討が必要であることがわかった。一方、再生粗骨材を使った場合には、置換する高炉スラグ細骨材の種類によって、間隙通過速度が低下する配合もあったことから、再生骨材コンクリートを設計する際には、使用する骨材や高炉スラグ細骨材の種類による性質を十分把握して配合設計する必要があることがわかった。

第 5 章から得られた結果からは、高炉セメント B 種を用い、低度処理再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートでも十分な施工性能と凍結融解抵抗性を有していることが分かった。ただし、凍結融解抵抗性に関しては、BFS を混和しても練り上がり後のコンクリートと間隙通過試験後のコンクリートで耐凍結融解抵抗性に影響がでる配合もあった。そのため、高炉セメント B 種を使用して BFS を混和させたコンクリートは、複合材料として複数の要因が発生することを予測して、耐久性や施工性能を低減させる要因を検証し、配合設計を綿密に設計する必要がある。これにより、再生骨材を使用する際の懸念となるアルカリ骨材反応においても抑制することができる高炉セメントを用いた再生骨材コンクリートの配合設計となり得ることが分かった。

6.2 今後の展望

昨今、再生骨材は少しずつ利用用途が拡大している。一般社団法人建設業連合会の資料¹⁾によると関西地区、関東地区で大臣認定取得実績のある生コンプラントも整備されてきており、さらにはゼネコンと共同で大臣認定を取得している生コンプラントも多数あるとされる。また、大臣認定を取得した生コンプラントは、再生骨材の管理も徹底しているとされており、普通骨材と同等以上の塩分管理やアルカリ・シリカ反応への対策と管理がお

こなわれている。一方、再生骨材は、その使用場所や使用方法が限定され需要が大きく伸びない場合、コンクリート構造物を解体した後に発生するコンクリート塊が廃棄物として扱われ、将来に廃棄場所の確保が難しくなることで行き場を失ってしまう可能性がある。その為、再生骨材の新たな需要を確保することで、海砂や山を削った砕石の使用量を抑えることが可能となり、再生骨材の市場も生まれて環境に配慮した循環型の建設サイクルの足がかりになると考えている。また、再生骨材は、大型ビルやコンクリート構造物が建ち並ぶ都心部で多く発生するとされており、現在、都市圏で使用されているコンクリート用の骨材は、主に遠方から運ばれてきている現状から、都市圏で発生した再生骨材 M や L を近隣の構造物やコンクリート二次製品に使用することによって、骨材運搬や廃棄物運搬に伴う二酸化炭素の排出量も削減することが可能となると考えている。次世代の期待としては、再生骨材のマイナス面として考えられている高い吸水率などは、その部分を応用し薬剤などの貯蔵箇所として使うことで、今までに無い機能性を有した機能性コンクリートとして利用することも可能と考える。

現在、筆者の日々の業務を生かし産学連携の取り組みとして、本論を応用し再生骨材 M や L、その他の再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの実用化に向けた研究開発を研究機関と協議を進めている。特に農道や市道、林道の路肩部分のコンクリートやコンクリート舗装などは、必ずしも高規格なコンクリートを敷設する必要が無く、施工性能や耐久性を確保できた再生骨材コンクリートで敷設できれば、地元のコンクリート構造物から発生する廃棄されるコンクリート塊をもう一度有効利用させることが可能になると確信している。さらには、東南海地震において中部地区、阪神地区、中国・四国地区で発生する建設構造物被害における建設廃棄物は、東北大震災を遙かに超える量になると予測されており、我々の世代は無視することが出来ない。今後、国内でコンクリート塊等の建設廃材リサイクルがさらなる技術の革新の為、大学・公設試等における研究機関の研究活動が活発となり、再生骨材等の再利用技術がコンクリート構造物へ普及する時代が来ることを期待している。

参考文献

1) 一般社団法人建設業連合会 HP：生コンクリート製造業の概要、再生骨材コンクリートの普及促進に向けて ― 低炭素・循環型社会の構築への貢献 ―、

URL： <https://www.nikkenren.com/publication/detail.html?ci=182>

謝辞

本論文は、徳島大学大学院 橋本親典教授のご指導のもと、筆者が徳島大学大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース 博士後期課程に在学期間中に実施した研究成果を取りまとめたものです。ここに至るまで、多くの方々からご指導、ご助言、ご協力を賜りました。

指導教員である橋本親典教授には、本研究の遂行および本論文の執筆、終始あたたかく親切なご指導を賜りましたことを感謝いたします。私の仕事が忙しく、大学での研究が思うように進まないときにご助言を頂けたこと、本当に感謝しております。

徳島大学大学院 上田隆雄教授、上月康則教授には学位審査の労をお取り頂きました。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。

渡辺 健准教授には、本研究の遂行にあたり終始あたたかく親切なご指導・ご鞭撻を頂きましたこと感謝いたします。

立命館大学理工学部 山田悠二特任助教には、実験の指導、論文の執筆指導など、沢山のご指導やご助言を頂きましたこと感謝いたします。

石丸啓輔技官には、実験を行うにあたり実験器具の準備や使用方法についてのご指導、実験の際のトラブルへの対応など多くのご協力を頂きましたこと感謝いたします。

高知工業高等専門学校 横井克則教授には、本研究で使用する必要が急遽発生した計測機器を快く貸していただき感謝いたします。また、近藤拓也准教授には、セメント・コンクリート協会の論文執筆でご助言を頂きましたこと感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、岡 友貴君（現・西松建設(株)）、浅野拓巳君（現・ヤマト住建(株)）、宮崎優治君（大学院）、平尾哲也君（現・(株)森組）、山野裕喜君（現・五洋建設(株)）、辻 健斗君（4 学年）をはじめとする徳島大学コンクリート工学研究室の皆様には、多くのご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

筆者が徳島大学大学院での研究に取り組むことができたのは、大学院への入学の際に沢山のアドバイスを頂けた平塚和男博士によるものと考えております。平塚和男博士には、大変お世話になりました。また、元・四国 TLO 事業本部長 牧野 聡氏（現・四国電力株式会社）には、本学への入学の際に推薦をいただけたこと感謝いたします。最後に、休日返上で研究活動や論文執筆に取り組んでも不平不満を言わずに見守ってくれた家族と両親に感謝し、特に修学中、長期間に渡り深夜遅くまで取り組まざるを得ない状況に、終始、私の体調を心配してくれた妻・康代には感謝の念が絶えません。ここに付記し、皆様に深謝いたします。